



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Studijní program: **P2612** **Elektrotechnika a Informatika**
Studijní obor: **3901V55** **Aplikované vědy v inženýrství**

Vliv mechanických veličin na síly působící v kondenzátorech s asymetrickými elektrodami

The influence of mechanical parameters on forces affecting a capacitor with asymmetrical electrodes

DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor: Ing. Bc. Michal Malík

Školitel: Doc. Ing. Miroslav Svoboda

Prohlášení

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací se svým školitelem.

V Liberci 1. 3. 2014

Podpis:

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat svému školiteli doc. Ing. Miroslavu Svobodovi za trpělivost, zájem a připomínky jak formální tak obsahové, jež jsem velice rád ve své práci zohlednil. Dále jsem vděčný osazenstvu Laboratoře laserové anemometrie nejen za kvalitní vizualizaci prováděnou i v nestandardních podmínkách, zapůjčení nezbytného vybavení, ale také za poskytnutý pracovní prostor, díky němuž jsem mohl provádět svá měření v alespoň částečně adekvátních podmínkách. V neposlední řadě bych chtěl touto cestou poděkovat také svému kolegovi, který se mnou na zkoumání jevu spolupracoval, Ing. Bc. Jiřímu Primasovi. Mnohahodinové společné debaty poskytly podnět k leckterému měření a jsem si jist, že bez spolupráce s ním by výzkum neprobíhal zdaleka tak produktivně.

Anotace

Disertační práce se zabývá mechanickými vlastnostmi kondenzátoru s asymetrickými elektrodami a jejich vlivy na velikost síly vznikající na tomto kondenzátoru po připojení na vysoké napětí. V první části je popsána historie i současný stav výzkumu jevu spojeného s tímto zařízením.

V další části jsou diskutovány metody použitelné k měření síly vznikající na kondenzátoru. Z nich je vybrána ta nejvhodnější. Stejně tak je vybrán základní tvar zkoumaného kondenzátoru dovolující nezávislé změny rozměrů. Ty jsou v následných měřeních měněny a je zkoumán vliv těchto změn na velikost vznikající síly. Je zde také diskutován negativní vliv proudění vzduchu, které vzniká kolem kondenzátoru současně s generovanou silou.

Aby byl tento vliv eliminován, byl postaven nový asymetrický kondenzátor. Na rozdíl od prvního, jehož velká elektroda je pevným jednolitým objektem, je velká elektroda nového kondenzátoru tvořena vodivou sítí, která dovoluje průchod proudění neutrálního vzduchu. Nový kondenzátor je podroben měření a je ověřena validita jeho použití. V poslední části práce je z výsledků měření sestaven popis vlivu změny rozměrů pro oba typy kondenzátoru a je vytvořen návod pro maximalizaci generované síly.

Klíčová slova:

Kondenzátory s asymetrickými elektrodami, vysoké napětí, Vznikající síla, změna rozměrů.

Annotation

The doctoral thesis deals with mechanical properties of a capacitor with asymmetrical electrodes and their influence on the force originating on this capacitor while it is connected to high voltage. In the first part of the thesis the history and current state of the research of this phenomenon is given.

In the next part possible methods of measuring are discussed and the most appropriate is selected. A default design of a capacitor allowing independent changes of its dimensions is chosen. These are then changed during the following measurements and the influence of these changes on the resulting force is investigated. The negative impact of an air flow generated around the capacitor concurrently with the force is also discussed.

To eliminate this, a new asymmetrical capacitor was built. Unlike the first one, which has a solid large electrode, the large electrode of this new device is formed by a wire mesh, which does not hinder the neutral air flow. The new capacitor is then measured and the validity of its use is verified. In the last part of the thesis a description of impact of dimension changes on both capacitors is derived and a set of instructions to maximize the generated force is stated.

Key words:

Capacitors with asymmetrical electrodes, change of dimensions, generated force, high voltage.

Obsah

Úvod	9
1. Kondenzátory s asymetrickými elektrodami	11
1.1. Historie jevu	13
1.2. Současný stav	16
1.3. Jevy spojené se vznikem sil	20
1.4. Teoretická východiska	23
1.5. Základní pojmy z elektrostatiky	25
1.6. Vlivy prostředí	27
2. Cíle práce	30
3. Příprava měření	31
3.1. Metody měření	31
3.2. Zvolená metoda měření – vážení	39
3.3. Zkoumaný kondenzátor	41
3.4. Měřicí sestava a postup měření	43
3.5. Potvrzení měřicí metody a orientace měřeného kondenzátoru	45
4. Vliv rozměrů elementu	48
4.1. Průměr malé elektrody	48
4.2. Vzdálenost elektrod	53
4.3. Rozměry velké elektrody	56
4.3.a. Délka	56
4.3.b. Výška velké elektrody	60
4.3.c. Šířka velké elektrody	63
5. Vliv aerodynamického odporu	65
5.1. Rychlost generovaného proudění vzduchu	65
5.2. Minimalizace odporu prostředí	69
6. Sít'ová elektroda	73
6.1. Elektrické pole kolem vodivé sítě	73
6.2. Hustota sít'ové elektrody	76
6.3. Šířka sít'ové elektrody	82
6.4. Větší počet malých elektrod	84
7. Shrnutí	88
Závěr	90

Slovník symbolů a zkratek

ACT	Asymmetrical Capacitor Thruster
F_E	síla vznikající na kondenzátoru
I, I_1, I_2	elektrický proud procházející mezi elektrodami kondenzátoru
d	vzdálenost mezi malou a velkou elektrodou
k	konstanta pohyblivosti iontů
Q, q	elektrický náboj
F_e, \vec{F}_e	síla působící na náboj v elektrickém poli
ε_0	permitivita vakua
ε_r	relativní permitivita prostředí
\vec{r}^0	značí jednotkový vektor
\vec{r}	polohového vektoru
\vec{E}	vektor intenzity elektrického pole
S	obsah plochy elektrody kondenzátoru
U	elektrické napětí
l	lineární rozměr desek kondenzátoru
F_O	síla vyvolaná aerodynamickým odporem
F_{VZ}	vztlaková síly
C_x	tvarový koeficient aerodynamického odporu
ρ	hustota okolního média
LDA	Laser Doppler Anemometry
PIV	Particle Image Velocimetry
F_G	gravitační síla
F	výsledná síla generovaná na asymetrickém kondenzátoru
g	gravitační zrychlení
m	celková naměřená hmotnost
m_0	počáteční naměřená hmotnost
Δm	změna hmotnosti

a, a_1, a_2	délka elektrod
b	výška velké elektrody
c	šířka velké elektrody
p	průměr malé elektrody
ρ_i	hustotu iontů vznikajících na jednotce délky malé elektrody
v	rychlost proudění
L	vzájemná vzdálenost vláken sítě
F_n	Fourierův rozvoj
n	harmonický stupeň
A_n	amplituda oscilací
p_v	průměr vláken sítě
ρ_s	hustota síťky
R^2	koeficient spolehlivosti
d^+	vzájemná vzdálenost malých elektrod

Úvod

Do dnešního dne se podařilo vysvětlit mnoho v minulosti záhadných a zdánlivě nevysvětlitelných jevů. Jedním z těch, které jsou dlouho známé ale jejichž podrobný popis nám stále chybí, je jev, při kterém po připojení vysokého napětí na soustavu dvou asymetrických elektrod dojde ke vzniku síly, která ovlivňuje obě elektrody ve stejném směru. Nejde tedy o klasickou Coulombovskou přitažlivou sílu mezi opačně nabitými elektrodami.

Na tento jev narazil mladý americký výzkumník T.T. Brown jen několik let po skončení první světové války. Společně se svým lektorem Dr. P. A. Biefeldem se tak zapsal do historie jako objevitel fenoménu, který se dnes nazývá podle obou vědců.

Pokusy o vysvětlení a následnou aplikaci fenoménu se zabývalo v následujících devadesáti letech velké množství lidí. Patřili mezi ně amatérští nadšenci, jejichž motivací bylo cokoli od romantických cílů objevitelství a dobrodružství při hledání zatím zcela neznámého a nepopsaného jevu až po zcela praktické cíle slávy a peněz za potenciální patenty.

Ovšem s podobnou motivací k výzkumu jevu přistupovali i lidé, které věda a výzkum živí. Ti v něm viděli především alternativní způsob řešení daného problému. Fenoménu se uplynulý čas věnovali lidé téměř ze všech průmyslových odvětví a oblastí fyziky. Příkladem můžeme uvést majora Alexandra de Severského, pilota a leteckého konstruktéra, který se jevem začal zabývat v šedesátých letech dvacátého století a viděl v něm budoucnost letectví. Jeho plán zkonstruovat létající stroje fungující na principu zkoumaného jevu ovšem nevyšel. Důvodem byly nedokonalé technologie a nedostatečné parametry použitých materiálů omezující praktické využití.

Z dalších výzkumníků z jiných oblastí fyziky, kteří se jevem zabývali, můžeme zmínit například Matthew Rickarda z Kalifornské univerzity. Zatímco jeho předchůdci hledali využití pro vznikající sílu, Rickard chtěl naopak využít proudění vzduchu, které bylo při funkci zařízení pozorováno.

Pokusy o možné uplatnění tohoto jevu v letectví však neskončili s de Severského neúspěchem. Zájem o tuto problematiku se hlavně v současné době a díky nástupu nových technologií vrátil zpět z pozice neuskutečnitelného do potenciálně uplatnitelného. To je patrné ze zpráv a patentů, které byly vytvořeny pod patronátem seriózních organizací jako je NASA, popřípadě laboratoře v rámci Britského ministerstva obrany (DSTL).

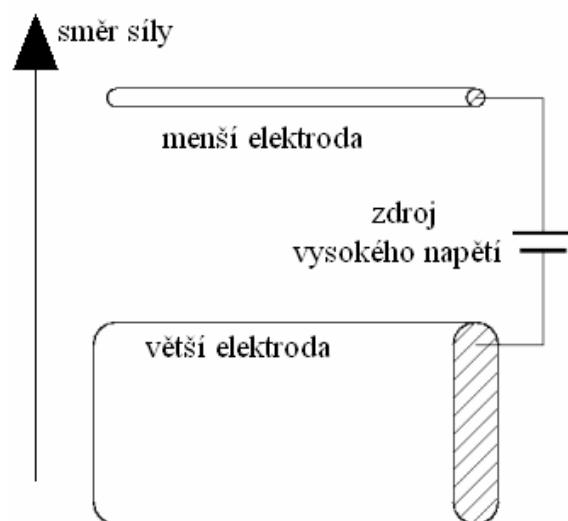
Ačkoliv je zmíněný jev zkoumán již téměř devadesát let, velice málo studií přišlo s čímkoliv jiným než pouhým potvrzením existence jevu, ať už z důvodu utajení, nebo nedostatku odbornosti. Doposud byl předmětem zkoumání hlavně vliv tzv. elektrických

parametrů, tedy použitého elektrického napětí, proudu, přítomnost dielektrika mezi elektrodami apod.

Ačkoliv již bylo několikrát potvrzeno, že za vznikem síly stojí pohyb média kolem asymetrických elektrod kondenzátoru, dokonce i metoda měření většiny dosavadních výzkumníků spočívala v pozorování pohybu přípravků plynným prostředím, vlivem tvaru elektrod na velikost vznikající síly se zatím nikdo cíleně nezabýval. V této práci se tedy budu zabývat právě mechanickými veličinami a možnostmi, jak vznikající sílu zvýšit a zefektivnit tak fungování jevu pomocí změn v geometrii přípravků.

1. Kondenzátory s asymetrickými elektrodami

Jev, který se chystám ve své práci zkoumat, se nejmarkantněji objevuje na kondenzátorech s asymetrickými elektrodami – tj. s elektrodami nestejných rozměrů. Po připojení vysokého stejnosměrného napětí (v řádu desítek kV) na aparaturu dochází ke vzniku síly (v řádu mN) působící na celý kondenzátor zpravidla ve směru od větší elektrody k menší (viz obr. 1).



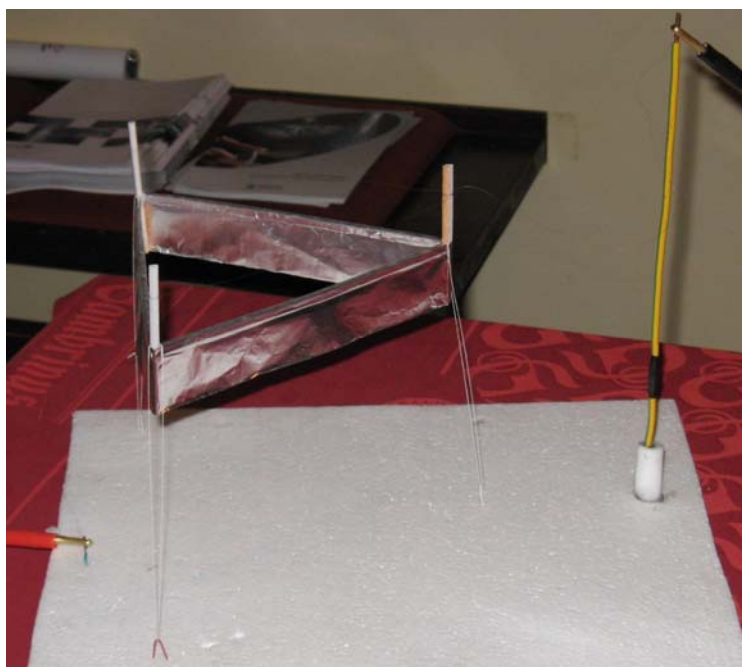
Obr. 1: Schéma kondenzátoru a směr vznikající síly – upraveno z [2]

Jelikož síla ovlivňuje celý kondenzátor v jednom směru, můžeme s jistotou říci, že se nejedná o pouhou manifestaci Coulombovské přitažlivé síly mezi opačně nabitými elektrodami.

Přípravky, které se chystám podrobit zkoumání, lze nazývat kondenzátory pouze na základě vnější schématické podobnosti s těmito součástkami. Jak kondenzátory, tak naše přípravky, mají dvě elektrody v konstantní vzdálenosti od sebe, které mohou, ale nemusí být obklopené dielektrikem. Jelikož se ale většina přípravků vyznačuje velkým rozdílem ve velikosti elektrod a jejich relativně velkou vzdáleností, je jejich kapacita, která je u kondenzátorů hlavní veličinou, minimální. Navzdory tomu se podržím slovního spojení kondenzátor s asymetrickými elektrodami, neboť se za dobu zkoumání tohoto jevu termín vžil.

Vzhledem k tomu, že pro vznik síly je potřeba kromě zdroje vysokého napětí již pouze soustava dvou výrazně asymetrických elektrod, což je podmínka snadno splnitelná, od doby objevu tohoto fenoménu se asymetrické kondenzátory generující mechanickou sílu vyskytly v

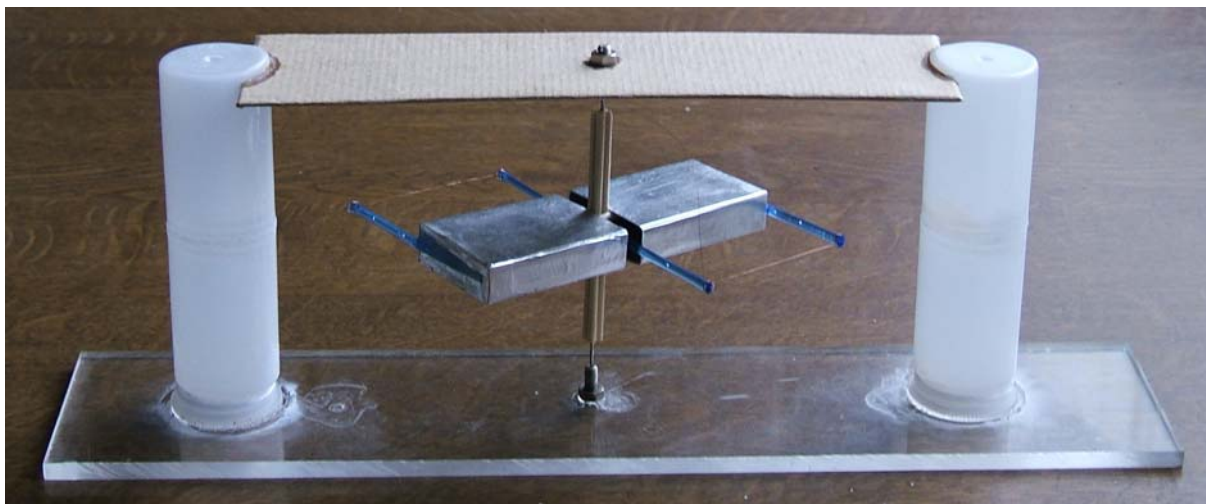
mnoha podobách, typech, či variantách. V současné době je nejčastěji používaná podoba asymetrického kondenzátoru tzv. *lifter*. Tento typ přípravku je obvykle sestaven z více jednotlivých kondenzátorů vodivě spojených vedle sebe, které dohromady tvoří uzavřený rovnostranný n-úhelník (často se objevuje uspořádání do trojúhelníku nebo do čtverce). Elektrody jsou v tomto případě umístěny tak, že menší je zavěšena v konstantní vzdálenosti nad větší (viz obr. 2). Tím je zapříčiněno, že vznikající síla míří vzhůru a má snahu celou aparaturu zvedat – odtud název *lifter*. Pokud je přípravek postaven z dostatečně lehkých materiálů a připojené napětí je dostatečně vysoké, přípravek vzlétne. Tento fakt je také důvodem, proč je *lifter* velice oblíbený, a to převážně mezi amatérskými nadšenci. Funkční model (tj. takový, který se vznese nad podložku) totiž neoddiskutovatelně potvrzuje přítomnost vznikající síly. Ta je následně vysvětlována podle fyzikálního aparátu, který má výzkumník k dispozici.



Obr. 2: Model asymetrického kondenzátoru typu *lifter*

Naopak uspořádání, které je často využíváno pro serióznější výzkum, není až tak atraktivní pro laického pozorovatele, ale zato dovoluje do jisté míry kvantifikovat projev síly vznikající na kondenzátoru s asymetrickými elektrodami. Obvykle se označuje zkratkou *ACT* pocházející z anglického názvu „Asymmetrical Capacitor Thruster“ (pohon z asymetrického kondenzátoru) a jeho podoba vychází z původních náskresů objevitele jevu T. T. Browna. ACT je tvořen dvěma vzájemně izolovanými asymetrickými kondenzátory upevněnými na vertikální osu proti sobě tak, aby se společným působením kolem osy otáčely – vznikající síla

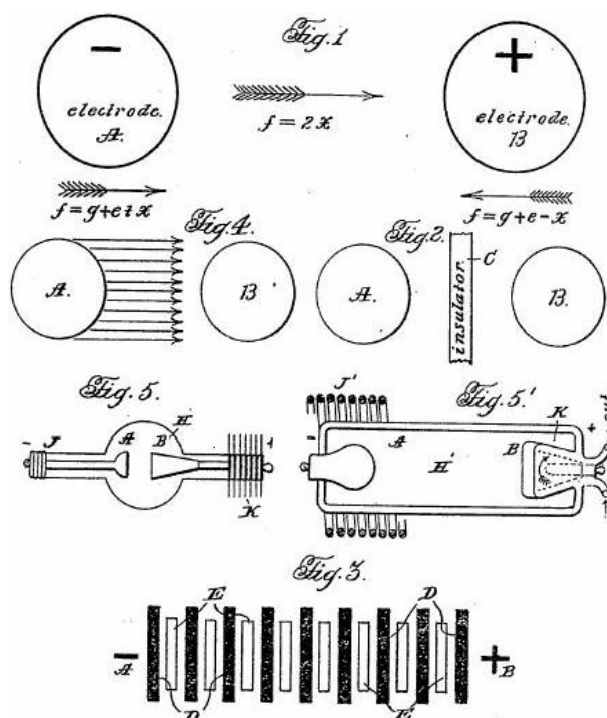
na obou elementech tvoří silovou dvojici (viz obr. 3). Výslednou sílu je následně možné určit nepřímo jako rychlost, popřípadě jako počet otáček za čas.



Obr. 3: Model rotačního uspořádání dvojice asymetrických kondenzátorů - ACT

1. 1. Historie jevu

Během 20. let 20. století, experimentoval Thomas Townsend Brown s rentgenovou trubicí známou jako „Coolidgeova trubice“ (skleněná trubice, ve které vakuum obklopuje dvě asymetrické elektrody, sloužící ke generování rentgenového záření), kterou vynalezl v roce 1913 fyzikální chemik William D. Coolidge. Brown zjistil, že po připojení trubice na vysoké napětí, na ni začne působit mechanická síla – tato síla nepůsobila mezi elektrodami samými (jak vyplývá z Coulombova zákona), ale naopak měla tendenci pohybovat celou aparaturou. Byl přesvědčen, že objevil nový princip elektromagnetismu a gravitace. Brown si svůj objev nechal patentovat roku 1927. Patent byl přijat rok na to jako britský patent č. 300311 pod názvem „A Method of and an Apparatus or Machine for Producing Force or Motion“ (Metoda a aparát nebo stroj na vytváření síly nebo pohybu) [3]. Tento patent popisuje Brownovu ranou práci na asymetrických kondenzátorech (viz obr. 4).



Obr. 4: Směr síly mezi elektrodami a přípravek, který Brown nazývá „gravitor“

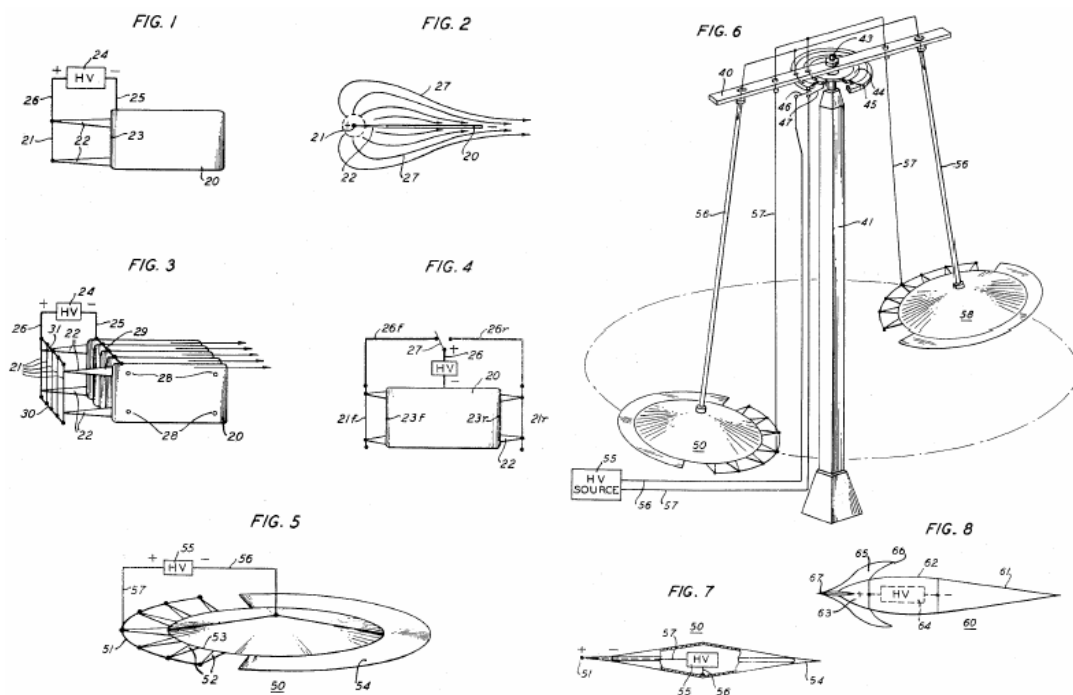
- vyňato z patentu č. 300311

Vyplývá z něho, že Brown přisuzuje vzniklou sílu interakci elektromagnetismu s gravitací. Cituji:

„Tento objev se týká způsobu, jak kontrolovat gravitaci a získávat z ní energii, taktéž se týká způsobu vytváření lineární síly nebo pohybu. Tato metoda je čistě elektrická.“ [3]

Objev Biefeld-Brownova efektu – jak byl jev později nazván – je obecně přisuzován Thomasi Townsendu Brownovi. Jak už ale název jevu napovídá, na jeho zkoumání se podílel Brownův mentor, Dr. Paul Alfred Biefeld, profesor fyziky a astronomie na Denisonské universitě v Ohiu, kde Brown působil jako asistent na katedře fyziky.

Roku 1957 Brown podal další patent pod názvem “Electrokinetic Apparatus” (Elektrokinetický aparát). Patent byl přijat roku 1960 jako U.S. patent č. 2949550. Tentokrát Brown popisuje jev mnohem podrobněji, včetně několika možných aparatur (viz obr. 5), ale nezmiňuje se – na rozdíl od předchozího patentu č. 300311 – o možných vlivech přípravků na gravitaci.



Obr. 5: Možnost uspořádání elektrokinetických aparatur

- vyňato z U.S. patentu č. 2949550

Brownova tvrzení i kresby v tomto patentu jasně ukazují, že Brown viděl možnost využití síly vznikající na asymetrickém kondenzátoru coby pohonu vozidel. Některé jeho kresby se až nápadně podobají designům, které jsou v dnešní době k vidění na internetu. V patentu z roku 1960 (U.S. patent č. 2949550) uvádí Brown též několik zajímavých a důležitých faktů [4]:

- Největší síla na kondenzátor působí tehdy, je-li menší elektroda nabita kladně.
- Jev se objevuje v dielektriku (např. vzduch).
- Jev může být použit k pohonu vozidel nebo na čerpání dielektrické tekutiny.
- Brown považuje za původce jevu pohyb iontů.
- Přesný fyzikální popis vzniku či původu jevu není znám.

Nedlouho po Brownovi, roku 1958, podal Agnew Hunter Bahnson jr. patent nazvaný „Electrical Thrust Producing Device“ (Přístroj na vytváření elektrického tahu), který byl přijat roku 1960 jako U.S. patent č. 2958790. V tomto patentu se Bahnson pokusil vylepšit konstrukci kondenzátoru, avšak stejně jako Brown zvolil konfiguraci rotujících kondenzátorů [5].

Ještě roku 1957 podal Brown další patent nazvaný tentokrát „Electrokinetic Transducer“ (Elektrokinetický měnič). Patent byl přijat až roku 1962 jako U.S. patent č. 3018394. V tomto patentu se Brown zabývá inverzním jevem, tj. případem, kdy se dielektrikum mezi vysokonapětovými elektrodami mechanicky pohybuje a vyvolá tak změnu náboje na elektrodách (podobně jako u Faradayova zákona elektromagnetické indukce). Cituji:

„Také jsem objevil, že pokud se okolní médium pomocí vnější mechanické síly pohybuje relativně k oběma elektrodám, objeví se na elektrodách změna potenciálu, která odpovídá změnám použité mechanické síly.“ [6]

Tím také ukazuje, že existuje vztah mezi vzniklou silou a médiem obklopujícím elektrody.

Až do té doby byla síla působící na asymetrický kondenzátor zaznamenána jen pokud byl kondenzátor obklopen dielektrikem. Roku 1958 Brown podal další patent, navazující na jeho předešlou práci, nazvaný “Electrokinetic Apparatus”. Patent byl přijat roku 1965 jako U.S. patent č. 3187206. Význam tohoto nového patentu spočíval v tom, že popisuje existenci síly na kondenzátoru s asymetrickými elektrodami dokonce i ve vakuu (bez přítomnosti jakéhokoliv okolního média). Brown přímo uvádí:

„Pokud zařízení pracuje v tekutém médiu (dielektriku), jako je vzduch, objeví se reakční síly působící v tomto médiu a stejně tak na všech pevných tělesech tvořících okolní prostředí.“

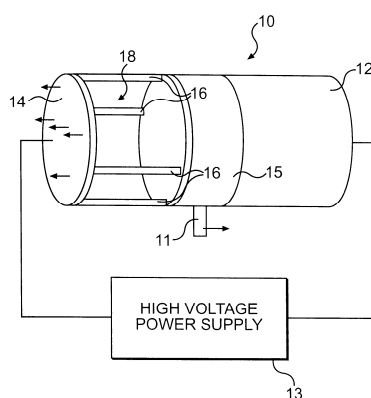
„Ve vakuu se tyto reakční síly objevují na pevných tělesech, jako jsou stěny vakuové komory. Avšak pokud jsou všechna okolní tělesa odstraněna ze zjevného efektivního dosahu elektrického pole, hnací síla nezmizí.“ [7]

V následujících letech se objevilo několik dalších patentů a k výzkumu se přidávali mnozí další – odborníci i amatérští nadšenci – avšak základy pro toto další zkoumání byly vybudovány právě Brownem a jeho několika prvními patenty.

1. 2. Současný stav

Ze současných výzkumníků se sluší zmínit například Jonathana Campbella. Ten za podpory americké organizace National Aeronautics and Space Administration (NASA) přihlásil patent „Apparatus and method for generating thrust using a two dimensional

asymmetrical capacitor module“ (Aparát a metoda na generování tahu za použití dvourozměrného asymetrického kondenzátorového modulu) [8] přijatý roku 2001, ve kterém přišel se zařízením nápadně podobným zařízením, které ve svém patentu č. 2949550 uvedl Brown. Použil stejný rotační design, ve kterém jsou asymetrické kondenzátory upevněny na společnou osu jako dvojce sil (viz obr. 5). Jedinými změnami byly jinak řešené přívody vysokého napětí na elektrody a jiný tvar elektrod. Velká elektroda měla tvar válce a malá elektroda tvar disku o stejném průměru jako válcová elektroda (viz obr. 6). V tomto patentu (ani v následujícím „Apparatus for generating thrust using a two dimensional, asymmetrical capacitor“ z roku 2002) se Campbell nijak nesnažil vysvětlit princip jevu ani účel změn, které ve svém designu provedl, pouze potvrdil přítomnost síly.



Obr. 6: Asymetrický kondenzátorový modul

- vyňato z U.S. patentu č. 2949550

Naopak mezi výzkumníky, kteří svou prací přispěli k dalšímu pochopení tohoto jevu patří Thomas Bahder, který roku 2003 sepsal zprávu pro U.S. Army Research Laboratory „Force on an Asymmetric Capacitor“ (Síla na asymetrickém kondenzátoru) [9]. Ve zprávě diskutoval možné vysvětlení principu vzniku síly jako následek jednoho z několika známých jevů, které se vyskytují v přítomnosti vysokého napětí. Bahder uzavřel zprávu tím, že na vzniku síly má největší podíl jev nazývaný iontový drift. K tomuto závěru sice došel již Alexander de Seversky ve svém patentu z roku 1965 [10], ale Bahder tuto domněnku dokázal srovnáním experimentálních výsledků s teoretickými výpočty.

Dalším výzkumníkem na tomto poli, který měl stejně jako Bahder podporu významné organizace, byl Francis Canning, který roku 2004 pod patronátem NASA publikoval článek „Asymmetrical Capacitors for Propulsion“ (Asymetrické kondenzátory jako pohon) [11]. Canning při svých pokusech požíval stejné přípravky, jaké si před několika lety patentoval

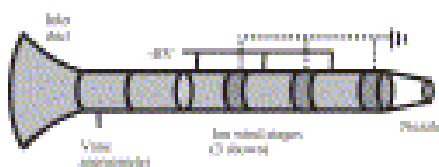
Campbell (viz obr. 6). Jeho článek potvrdil teorii nezávislosti přípravku na polaritě, tedy že síla vznikající na kondenzátor působí vždy ve směru od větší elektrody k menší, bez ohledu na polaritu elektrod. Dalším přínosem článku byl pokus o ovlivnění velikosti vznikající síly změnou poloměru křivosti hran jedné nebo obou elektrod. To byl také jeden z pokusů, které v Canningově článku podpořily teorii iontového driftu. Zaostřené okraje elektrod podporovaly ionizaci okolního vzduchu a s větším množstvím iontů přítomných v elektrickém poli docházelo k silnějšímu iontovému driftu.

Canning ve svém článku také popsal pokus za sníženého tlaku vzduchu. Pokouší se tím potvrdit, nebo vyvrátit teorii, se kterou ve svém patentu č. 3187206 přišel Brown, a to přítomnost zatím nepopsané síly, která vzniká na kondenzátoru bez ohledu na okolní médium, tedy i ve vakuu. Tento fakt se Canningovi potvrdit nepovedlo:

„Po několika dnech testování jsme zjistili, že žádný z přípravků nevykazoval známky rotace při tlacích pod 300 Torrů¹.“ [11]

Tento pokus opět potvrdil teorii o ionizaci plynu a následném pohybu iontů mezi elektrodami.

Ačkoliv již bylo několikrát potvrzeno, že za vznikem síly stojí pohyb média kolem asymetrických elektrod kondenzátoru, dokonce i metoda měření užívaná většinou dosavadních výzkumníků spočívala v pozorování pohybu kondenzátorů plynným prostředím (viz obr. 5), vlivem tvaru a mírou asymetrie se zatím nikdo cíleně nezabýval. Jedním z nemnoha výzkumných týmů, které zkoumaly vliv tvaru elektrod na velikost vznikající síly, byla skupina lidí kolem Matthew Rickarda. Ten roku 2006 publikoval článek s názvem „Maximizing ion-driven gas flows“ (Maximalizace proudění plynu hnaného ionty) [12]. V něm se zabýval vlivem geometrie větší elektrody na rychlost proudění elektricky neutrálního vzduchu. Větší uzemněnou elektrodu tvořila soustava vodivých uzemněných prstenců vnořených v nevodivé trubici, která se na konci výrazně zužovala (viz obr. 7), menší elektroda byla hrotová.



Obr. 7: Větší elektroda trubicového tvaru [12]

¹ Tlak 300 Torrů odpovídá přibližně 40 kPa.

Rickard se ve svých pokusech vůbec nezabýval měřením vlastní generované síly a zaměřil se pouze na měření rychlosti proudění vzduchu na konci trubicovité elektrody. Závěrem článku bylo zjištění, že jeho design byl schopen téměř zdvojnásobit do té doby naměřené hodnoty rychlosti proudění vzduchu. Vzhledem k tvaru jím použité trubicovité elektrody (v ústí široké a na výstupu velice úzké), se ovšem tento závěr dá snadno považovat za pouhé potvrzení zákona o zachování konstantního objemového průtoku.

Ze současných výzkumníků lze zmínit ještě např. G. Matsoukase, který roku 2012 publikoval svůj článek „Investigation of Ionic Wind as a Means of Generating Propulsive Force“ (Výzkum iontového větru jako způsobu generování hnací síly) [13]. V něm se snažil objasnit princip vzniku síly na kondenzátoru s asymetrickými elektrodami. Mimo jiné popsal pokus, při kterém kondenzátor se silně izolovanými elektrodami stále generoval sílu. Izolace elektrod podle Matsoukase zcela zabránila ionizaci vzduchu kolem nich, a proto se uchýlil k jinému vysvětlení vzniku síly než zatím vždy dostačujícímu a mnohokrát potvrzenému iontovému driftu. Za jev, který stojí za vznikem síly považuje polarizaci vzduchu vlivem asymetrie elektrod, tedy dielektroforézu.

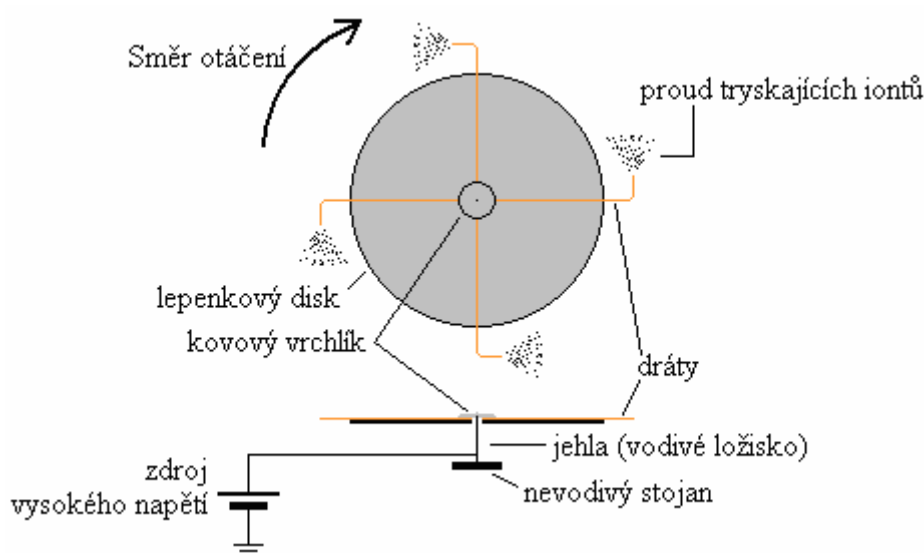
Všichni dosud jmenovaní, ač se někdy rozcházelí ve způsobech uchopení zkoumaného jevu, popřípadě v detailech vysvětlení možného principu, se však shodují v tom, že za původce síly považují relativně známé a do jisté míry popsané fyzikální jevy. Ovšem výzkum jevů na asymetrických vysokonapětových kondenzátorech přilákal i nemálo amatérských nadšenců a „pseudo-vědců“, kteří se pro vysvětlení jevu obrací k relativně obskurním, popřípadě špatně pochopeným fenoménům. Jako zástupce této skupiny lze uvést japonského inženýra Takaaki Mushu, který v období mezi roky 1994 a 2004 publikoval několik článků, ve kterých připisoval původ vznikající síly tzv. elektrogravitaci, tedy možné interakci elektrického pole s polem gravitačním. Ve svém článku z roku 2000 „Theoretical Explanation of the Biefeld-Brown Effect“ (Teoretické vysvětlení Biefeld-Brownova efektu) [14] tvrdí, že dostatečně vysoká intenzita elektrického pole může kolem ovlivněných atomů vytvořit mikroskopické gravitační pole, které působí proti gravitačnímu poli země a ve výsledku odlehčuje celé zařízení.

Tuto hypotézu se však nikdy nepodařilo dokázat, což ovšem nebrání dalším nadšencům, aby nepřicházeli s dalšími pokusy, které ji zdánlivě potvrzují.

1. 3. Jevy spojené se vznikem sil

Pokud odhlédneme od možnosti, že je výše popsáný vznik síly na kondenzátoru s asymetrickými elektrodami způsoben nějakým nám neznámým jevem, je nutné původce tohoto děje hledat ve známé fyzice. A jelikož je ke vzniku síly zapotřebí vysoké napětí, ale postačuje relativně nízký (vzhledem k použitému napětí) proud v řádu desítek až stovek μA , můžeme z oblasti fyziky, ve které jev způsobující vznik síly budeme hledat, vyřadit jevy související s magnetismem. Magnetické pole, které nám procházející proud může vyvolat, je nesrovnatelně nižší než pole elektrické, nehledě na to, že síly, které by mohly být způsobeny magnetickým polem, by byly o mnoho řádů nižší, než jaké jsou pozorovatelné na kondenzátorech s asymetrickými elektrodami. Omezíme se tedy pouze na jevy, které úzce souvisejí s vysokým napětím a vysokou intenzitou elektrického pole:

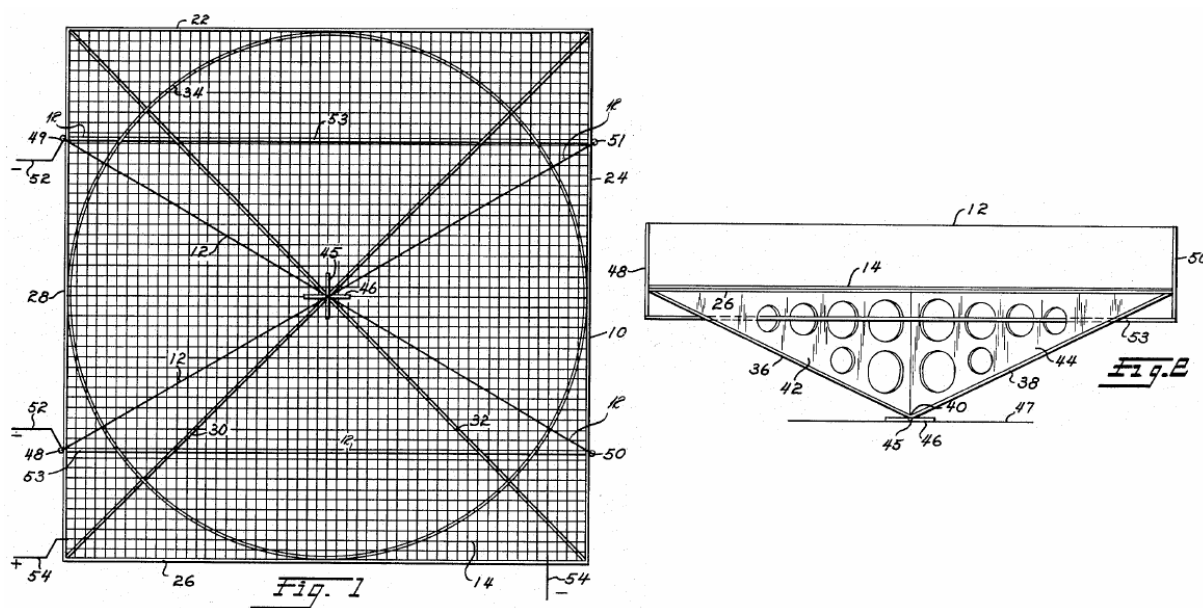
a) **Elektrický vítr** – je jev, který nastává kolem vodiče, na kterém je vysoký elektrický potenciál – tedy většinou na ostrých hrotech a malých poloměrech vodičů. Velká intenzita elektrického pole kolem takového vodiče způsobí ionizaci okolního prostředí. Opačně nabitě ionty jsou k hrotu přitahovány a neutralizují se. Avšak ty ionty, které mají náboj stejné polaroty jako je náboj vodiče, jsou od něho odpuzovány. Přitom s sebou strhují i okolní molekuly vzduchu a vzniká vítr. Pokud je zmíněný vodič ukotven dostatečně volně, může dojít k pohybu. Na tomto principu pracují některé elektrostatické reaktivní motorky (analogie Segnerova kola viz obr. 8). [2]



Obr. 8: Jednoduchý iontový motor ukazuje možnost užití proudu tryskajících iontů jako pohonu

b) *Iontový drift* – je jev principiálně velice podobný výše zmíněnému elektrickému větru. Hlavním rozdílem je ale fakt, že ke vzniku iontového driftu je potřeba přítomnost minimálně jedné další opačně nabité elektrody. Nabité částice jsou tedy dále urychlovány elektrickým polem přítomným mezi oběma elektrodami. Na své cestě od jedné elektrody ke druhé s sebou strhávají (prostřednictvím nárazů) neutrální částice okolního prostředí. Jelikož se ale částice stále nacházejí v dosahu elektrického pole, jsou „nuceny prolétnout“ celou dráhu mezi oběma elektrodami a cestou předávají svoji hybnost neutrálním částicím. Jelikož se částice nezastaví po několika málo srážkách jako je tomu u elektrického větru, ale pokračují dále poháněné elektrickým polem, je iontový drift – co se týče předané hybnosti – mnohonásobně efektivnější. [10]

Tento princip využívá major Alexander Prokofieff de Seversky, válečný letec a letecký inženýr, u svého aparátu, který nazval „Ionocraft“ a kterým hodlal inovovat moderní letectví. Dokazuje to U.S. patent číslo 3130945 z roku 1964 [10]. Aparát majora de Severského se skládá ze soustavy několika drátěných elektrod – na obr. 9 znázorněno číslem 12 – (ve svých dalších pracích diskutuje de Seversky možnost nahradit tyto drátěné elektrody kovovými hroty) umístěných nad hustou drátěnou sítí – na obr. 9 znázorněno číslem 14. Kolem horních elektrod se ionizuje vzduch a ionty se stejnou polaritou jako elektrody jsou přitaženy k opačně nabitým drátěné síťce. Cestou strhávají neutrální částice vzduchu, které však k nabitým drátům síťky přitahovány nejsou, a proletí skrz. Celé zařízení je tedy nadnášeno tímto proudem vzduchu.



Obr. 9: „Ionocraft“ majora de Severského, Fig. 1 – pohled shora, Fig. 2 – pohled z boku

- vyňato z U.S. patentu č. 3130945

c) *Dielektroforéza*

V souvislosti s pohybem částic v elektrickém poli je také nutné zmínit jev nazývaný dielektroforéza [2, 15]. Ta se objeví, pakliže je polarizovatelná částice přítomná v nehomogenním poli. Vlivem elektrického pole se částice polarizuje, čímž se na ní vytvoří dva opačně nabitě póly. Následně se částice natočí podle orientace pole. Protože je pole nehomogenní, na oba póly nepůsobí stejná síla, proto se částice dá do pohybu ve směru, ve kterém na daný pól působí větší přitažlivá nebo odpudivá síla. Vzhledem k tomu, že směr pohybu částice není závislý na orientaci pole ale na jeho gradientu, dielektroforéza se může objevit jak ve střídavém tak i ve stejnosměrném elektrickém poli. Vlastní polarizace a následně i směr výsledné síly je také ovlivněn rozdílem komplexních permitivit polarizované částice a okolního média.

Vzhledem k tomu, že pro vznik síly na asymetrickém kondenzátoru jsou potřeba stejné podmínky jako pro dielektroforézu, mohli bychom ji uvažovat jako možné vysvětlení tohoto jevu. Lze ovšem ukázat, že dielektrické konstanty (permitivita) okolního neutrálního vzduchu a polarizovaných molekul ve vzduchu přítomných (dusík, kyslík) jsou téměř totožné, a tedy i síla dielektroforézou způsobená je o několik řádů nižší než hodnoty naměřené na reálných přípravcích a tudíž zanedbatelná.

d) *Studená emise elektronů*

Brown ve výše zmíněném patentu číslo 3187206 z roku 1965 při popisu svého pokusu ve vakuu popsal jev naprosto nezávislý na okolním prostředí. Tento fakt dal popud ke vzniku mnoha dalších teorií o možném principu vzniku síly na asymetrickém kondenzátoru. Jedním z možných vysvětlení vzniku síly i při absenci okolního média je studená emise elektronů.

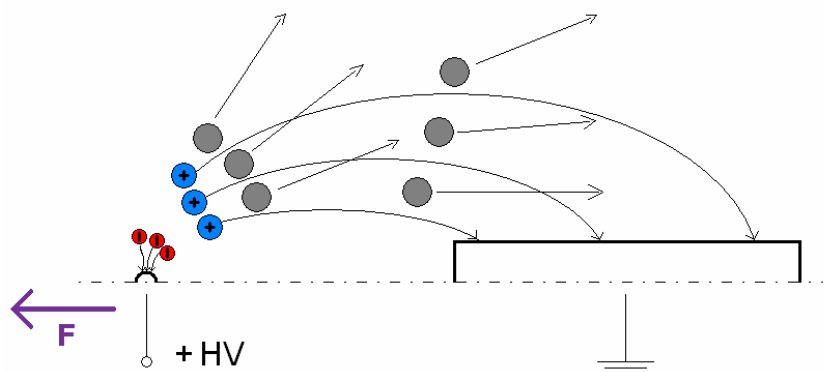
Kov obsahuje „volné“ elektrony (což mu dovoluje přenášet náboj), kterým za normálních okolností brání v opuštění materiálu přitažlivá síla. Pokud je jim ovšem dodáno dostatek energie, je možné aby byly elektrony z materiálu emitovány. Dobře známý je případ, kdy se materiál žhaví na velmi vysoké teploty a kinetická energie některých elektronů jim dovolí materiál opustit (např. žhavení vlákna elektrony). Energii je ovšem možné dodat místo teplem ve formě velmi vysokého elektrického pole v okolí kovové elektrody (proto studená emise). Protože je ale hmotnost elektronů ve srovnání s jinými částicemi, které se mohou podílet na vzniku síly, zanedbatelná a jejich polarita omezuje polaritu proudu zapříčiňující vznik síly na asymetrickém kondenzátoru, je hypotéza, kde je studená emise hlavním původcem síly za normálních podmínek, snadno zpochybnitelná.

1. 4. Teoretická východiska

Po seznámení s historií a současným stavem problematiky stejně jako s principy jednotlivých jevů, které jsou považovány za příčinu vzniku síly na asymetrickém kondenzátoru, je nutné vybrat jednu z teorií jako základ pro další zkoumání. Přestože se ve své práci nebudu podrobně zabývat přesným principem jevu ale spíše jeho projevy a možnostmi, jak je ovlivnit, je nutné pracovat v teoretickém rámci, který mi bude poskytovat pevnou teoretickou základnu pro plánování experimentů, ale také mi bude dovolovat činit závěry z experimentálně získaných hodnot.

Roku 2010 byl publikován článek s názvem „Force on a High Voltage Capacitor with Asymmetrical Electrodes“ (Síla na vysokonapětovém kondenzátoru s asymetrickými elektrodami) [16]. V něm byla vznesena hypotéza, která byla následně dokázána úspěšným porovnáním teoreticky získaných výsledků s experimentálně získanými hodnotami. Pro experimentální potvrzení hodnot bylo použito asymetrického kondenzátoru s malou elektrodou tvořenou tenkým drátem a aluminiovou folií potaženým kvádrem jako velkou elektrodou. Článek, stejně jako většina výzkumníků, vychází z předpokladu, že za vznikem síly je pohyb iontů. Popisuje princip vzniku síly takto:

- 1) Při poloměru drátové elektrody 0,1 mm a při napětí 10 kV je hodnota intenzity elektrického pole ve vzdálenosti 1 mm od povrchu drátu v řádu MV/m. Pakliže je okolním médiem vzduch, vzniká v okolí drátu při takto vysokých intenzitách elektrického pole velké množství nabitých částic obou polarit. To potvrzuje i koronový výboj, který lze za tmy kolem menší drátové elektrody vidět pouhým okem.
- 2) Nabité částice s opačným nábojem než menší elektroda jsou k ní okamžitě přitaženy a vybity. Naopak částice se stejnou polaritou jsou urychlovány ve směru vektoru elektrického pole na driftovou rychlost v_d a pohybují se směrem od stejně nabité menší elektrody k uzemněné větší elektrodě.



Obr. 10: Mechanismus vzniku síly

- 3) Protože se nabité částice pohybují prostředím, ve kterém jsou obklopeny velkým množstvím elektricky neutrálních molekul okolního vzduchu, za dobu své cesty od jedné elektrody k druhé do nich mnohokrát narazí (přibližně 10^7 srážek za sekundu).
- 4) Pokud kinetická energie nabitých částic urychlovaných elektrickým polem není dostatečná k ionizaci neutrálních molekul vzduchu, dochází při srážkách pouze k předání hybnosti.
- 5) Předpoklad je, že neutrální částice jsou do srážky stacionární, protože rychlost tepelného pohybu je zanedbatelná v porovnání s rychlostmi nabitých částic, které jim udělí elektrické pole.
- 6) Ze zákona o zachování hybnosti vyplývá, že po srážce by se měly neutrální částice a nabitá částice rozletět opačnými směry. Před srážkou byla nabitá částice urychlována působením elektrického pole směrem od stejně nabitě menší drátové elektrody. To znamená, že po srážce s neutrální molekulou by se měla pohybovat zpět směrem k elektrodě. Ale protože je stále v elektrickém poli, pohyb v tomto směru jí není umožněn, a naopak je znovu urychlena ve směru od stejně nabitě elektrody. Hybnost, kterou nabitá částice získala srážkou s neutrální částicí, se ale touto interakcí s elektrickým polem přenesla zpět na zdroj pole, tedy na celý kondenzátor.
- 7) Neutrální molekula, která po srážce získala hybnost stejně velkou ale opačně orientovanou, tuto hybnost postupně ztrácí dalšími srážkami s neutrálními molekulami okolního vzduchu. Protože ale nejsou přitahovány ani odpuzovány ani jednou z elektrod, jejich hybnost se na kondenzátor nepřenesla.

- 8) Vznikající síla má tedy svůj původ právě v tomto rozdílu – pouze nabité částice předají svou hybnost zpět na kondenzátor, zatímco neutrální molekuly nikoliv.
- 9) Když se nabitá částice dostane na konec své cesty, narazí do opačně nabité elektrody, ale hybnost, kterou při této kolizi předá kondenzátoru, je zanedbatelná oproti součtu hybností v opačném směru přenesené na kondenzátor v důsledku srážek s neutrálními molekulami.
- 10) Tento mechanismus funguje pouze za předpokladu, že oblast kolem tenké elektrody, ve které probíhá ionizace, je dostatečně úzká. Pokud hodnota intenzity elektrického pole v prostoru mezi elektrodami vzroste natolik, že umožní lavinovou ionizaci, síla vznikající na kondenzátoru se výrazně zmenší, neboť princip jejího vzniku závisí na tom, že neutrální částice vzduchu zůstávají neutrální i po srážce s nabitou částicí.

Autoři v další části článku [16] na základě těchto postulátů odvodili vzorec, který věrně popisuje vznik síly:

$$F_E = I \cdot \frac{d}{k}, \quad (1)$$

kde F_E je vznikající síla, I procházející proud, d je vzdálenost mezi elektrodami a k je konstanta pohyblivosti iontů.

Dále se v práci se budu opírat o tento princip vzniku síly.

1. 5. Základní pojmy z elektrostatiky

Jelikož o jevu, který se ve své práci chystám zkoumat, prakticky neexistuje literatura a jeho podstata je vysvětlována různými, mnohdy protichůdnými, způsoby, bylo nutné jeho zkoumání založit na základních fyzikálních veličinách a jevech.

Elektrické pole [17] je jeden z druhů fyzikálního pole, jehož zdrojem je těleso s elektrickým nábojem (tj. elektricky nabitě těleso). Je to pole, ve kterém se projevuje působení elektrických sil. Jeho tvar je možné graficky reprezentovat pomocí siločar nebo ekvipotenciálních ploch a závisí na tvaru tělesa, které je zdrojem elektrického pole, a na rozmístění a nábojích okolních nabitých těles.

Velikost přitažlivé (resp. odpuzivé) síly mezi dvěma náboji je vyjádřena Coulombovým zákonem, který říká, že bodový náboj Q působí ve své klidové soustavě na bodový náboj q **elektrickou silou**:

$$\vec{F}_e = \frac{1}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \cdot \frac{Qq}{4\pi r^2} \vec{r}^0, \quad (2)$$

kde ε_0 je permitivita vakua, ε_r je relativní permitivita prostředí a \vec{r}^0 značí jednotkový vektor polohového vektoru \vec{r} vedeného od náboje Q k náboji q .

Elektrické pole je charakterizováno veličinou **elektrická intenzita**, která vyjadřuje jeho velikost a směr síly působící na náboj v elektrickém poli.

Je dána vztahem:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{Q} \quad (3)$$

Je tedy rovna elektrické síle, která by působila na jednotkový kladný náboj Q .

Elektrické pole můžeme rozdělit podle tvaru siločar na dvě základní skupiny:

- homogenní – siločáry charakterizující pole jsou vzájemně rovnoběžné přímky.
- gradientní – siločáry pole jsou zakřivené, jejich tečny se mohou křížit, a gradient intenzity elektrického pole je nenulový:

$$\text{grad } \vec{E}(\vec{r}) \neq 0. \quad (4)$$

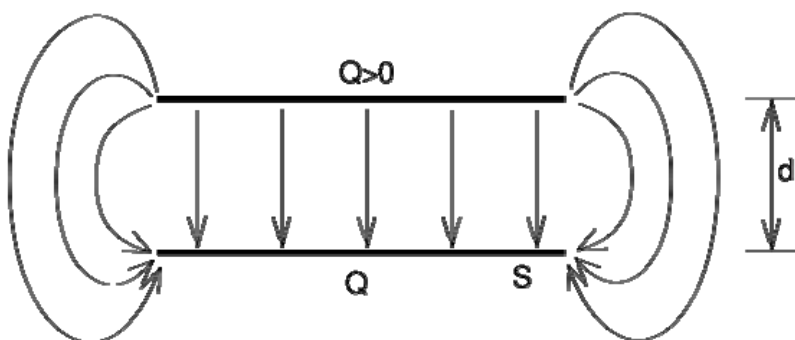
Abychom mohli uvažovat pohyb nabitých částic mezi elektrodami kondenzátoru, definujme si elektrické pole uvnitř kondenzátoru. Mějme tedy symetrický kondenzátor (např. deskový) tvořený dvěma rovnoběžnými stejně velkými elektrodami, jejichž účinná plocha má obsah S a jejichž vzdálenost je d . Připojíme-li tento kondenzátor ke zdroji napětí, vznikne na desce s vyšším potenciálem náboj $+Q$, na druhé $-Q$. Rovnost absolutních hodnot obou nábojů je důsledkem jejich vzájemného silového působení. Mezi deskami vznikne elektrostatické pole s intenzitou elektrického pole:

$$E = \frac{U}{d}, \quad (5)$$

kde U je napětí zdroje.

Na okrajích reálného deskového kondenzátoru však elektrostatické pole již není homogenní, neboť tam vznikají tzv. **okrajové jevy** (Obr. 11). Spolehlivost běžně uváděných vztahů charakterizujících děje v kondenzátorech je dána poměrem vzdálenosti desek d a jejich lineárního rozměru $l \approx \sqrt{S}$ (uvažujeme-li čtvercové desky). Pokud tedy poměr $\frac{d}{l} \rightarrow 0$, pak

jsou okrajové efekty malé a běžně uváděné vztahy platí poměrně přesně. Se zvyšováním tohoto poměru se vliv okrajových efektů uplatňuje stále více.



Obr. 11: Okrajové efekty u deskového kondenzátoru – upraveno z [2]

Okrajové jevy se dají popsat v jednodušších případech s využitím konformního zobrazení, ve složitějších případech je nutné aplikovat metodu konečných prvků.

Je zřejmé, že pokud bychom uvažovali kondenzátor asymetrický, dokonce se vzdáleností elektrod několikrát převyšující jejich lineární rozměr, dostáváme pole, které již nelze popsat vztahy pro deskový kondenzátor.

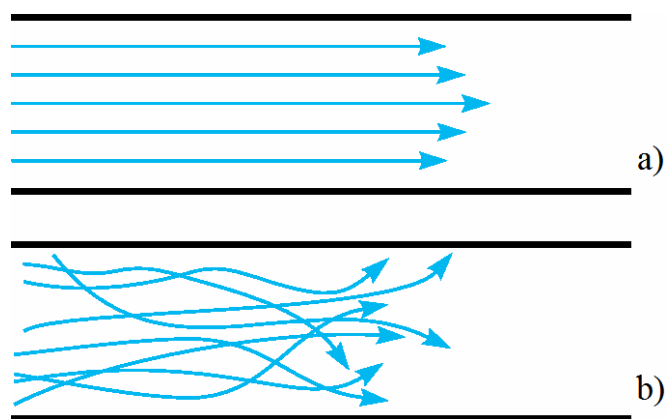
1. 6. Vlivy prostředí

Jelikož se většina experimentů bude odehrávat ve vzduchu, a některé budou spočívat v pohybu tělesa tímto médiem, je nutné se zmínit o vlivech, které může okolní prostředí mít na pohyb tělesa, popřípadě jak může pohybující se tekuté prostředí ovlivnit stacionární těleso, které obtéká.

Proudění, při němž v žádném objemu nedochází k rotačnímu pohybu kapaliny, je *nevírové* (potenciálové) proudění. V opačném případě jde o *vírové* proudění.

Jestliže se všechny částice kapaliny pohybují po vzájemně rovnoběžných přímkách, pak toto proudění nazýváme **laminárním**. (V reálném prostředí se laminárním prouděním rozumí proudění, při němž všechny proudnice uvnitř proudové trubice jsou křivky navzájem paralelní.)

Naopak **turbulentní** proudění je vírové proudění s nepravidelným tvarem proudnic, které se často protínají. [18]



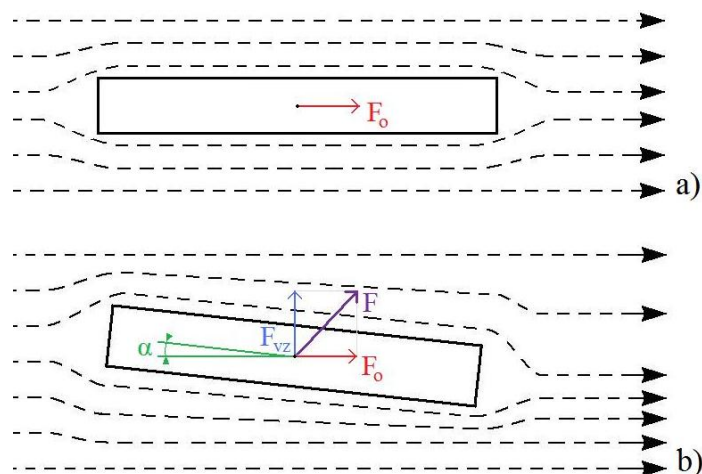
Obr. 12: Příklad proudění a) laminárního a b) turbulentního

Postavíme-li proudění do cesty pevný objekt, změní se průběh proudění, ale zároveň bude silově ovlivněn i sám objekt. Sílu působící na objekt nazýváme **silou odporovou**. U reálných tekutin vzniká v důsledku vnitřního tření odporová síla, působící proti směru relativního pohybu tělesa v tekutině (nezáleží na tom, zda se pohybuje těleso v tekutině, nebo těleso stojí a tekutina jej obtéká).

Síla vyvolaná odporem prostředí se skládá z několika složek:

- *Parazitní odpor* – Jedná se o sílu působící na těleso ve směru proudění. Parazitní odpor má několik složek, z nichž nejdůležitější je *tvarový odpor*. Ten je způsoben tvarem a velikostí pevného objektu vloženého do proudícího média. Čím větší kolmý profil a méně aerodynamicky optimální tvar, tím větší odporová síla. Další složkou parazitního odporu je *povrchové tření*, které závisí na drsnosti povrchu. Opět větší drsnost povrchu zvýší celkovou odporovou sílu. Poslední složkou je *interferenční odpor*. Ten je způsoben přítomností dalších pevných těles ve stejném proudění. Ty mohou ovlivnit rychlost a směr proudění, které následně naráží do námi zkoumaného objektu, a tak naruší a změní celkovou charakteristiku proudění kolem něj.
- *Vztlak* – Na těleso symetrické vůči okolnímu proudění (osa symetrie tělesa je rovnoběžná se směrovým vektorem proudění) působí pouze síla ve směru proudu. Pokud je obtékané těleso asymetrické vůči nabíhajícímu proudu, popřípadě je těleso symetrické, ale je asymetricky orientováno vůči proudu, je výsledná odporová síla působící na těleso obecně orientována (viz obr. 13). To je způsobeno rozdílem tlaků na obou stranách tělesa. Sílu je v tomto případě

možné rozložit na dvě složky, výše zmíněný odpor (rovnoběžný s nabíhajícím proudem) F_O a vztlak, působící kolmo na proudění F_{VZ} .



Obr. 13: Proudění média a) kolem objektu symetrického vůči proudění a b) kolem stejného objektu natočeného vůči směru proudění o úhel α

Takto vznikající vztlaková síla má ovšem největší význam při rychlostech blízkých, popřípadě překračujících rychlost zvuku. Je však také pravda, že i při nižších rychlostech obtékání se může charakter proudění, a tedy i výsledná odporová síla (velikost i směr), změnit vlivem asymetrie tělesa, nebo jeho orientací vůči směru proudění.

Výsledná odporová síla závisí na vlastnostech okolního tekutého média, relativní rychlosti obtékání tělesa a jeho velikosti a tvaru. Za normálních podmínek se uvádí vztah pro odporovou rychlost takto:

$$F_O = \frac{1}{2} C_x S \rho v^2, \quad (6)$$

kde S je obsah kolmého průřezu tělesa, ρ je hustota tekutého média, v je vzájemná rychlost tekutého média a tělesa a C_x je bezrozměrný tvarový koeficient odporu. Tvarový koeficient je veličina empirická a je nutné ji pro každý tvar tělesa určit, neboť tabelované jsou pouze základní tvary. [2]

Tvar a směr proudění	Tvarový koeficient	Tvar a směr proudění	Tvarový koeficient
koule $\rightarrow \bigcirc$	0,47	dlouhý válec $\rightarrow \square$	0,82
polokoule $\rightarrow \bigcap$	0,42	krátký válec $\rightarrow \square$	1,15
krychle $\rightarrow \square$	1,05	kapka $\rightarrow \bullet$	0,04

Obr. 14: Vybrané tvarové koeficienty pro základní tvary – upraveno z [2]

2. Cíle práce

V této práci bude mým hlavním cílem kriticky zhodnotit vliv tvaru kondenzátoru a aerodynamiky na velikost na něm vznikající síly. Protože se jedná o cíl komplexní, rozložil jsem si jej na několik dílčích cílů, které budu v této práci postupně plnit:

- *Nalezení efektivní metody na změření síly vznikající na kondenzátoru s asymetrickými elektrodami.* Z několika důvodů popsaných v následující kapitole nelze použít standardní metody na měření malých sil. Proto bylo nutné najít postup, který by obešel všechny problémy spojené s touto úlohou.
- *Příprava kondenzátoru s dostatečně jednoduchým základním tvarem.* Abychom našli vliv jednotlivých změn tvaru kondenzátoru, musíme najít takový tvar, který nám dovolí změnit vždy jen jeden rozměr, aniž bychom měnili jeho další parametry.
- *Ověření vlivu změny jednotlivých rozměrů na velikost vznikající síly.* Zde je potřeba nejprve zjistit, zda mají jednotlivé změny tvaru vliv na vznikající sílu, a následně tento vliv popsat.
- *Ověření vlivu proudění vzduchu na velikost vznikající síly.* Z rešerše víme, že jako vedlejší produkt vzniku síly se kolem kondenzátoru objevuje proud vzduchu ve směru opačném než působí síla. Je tedy potřeba zjistit zda, a popřípadě jaký, má toto proudění vliv na kondenzátor, a jak ovlivní naměřenou sílu.
- *Nalezení optimálního tvaru kondenzátoru.* Na základě faktů zjištěných v předešlých bodech bude možné navrhnout a otestovat tvar kondenzátoru, ve kterém budou eliminovány všechny negativní vlivy přítomné u předchozích tvarů.

3. Příprava měření

Z rešerše víme, že síla vznikající na asymetrickém kondenzátoru je relativně malá (v řádu mN) a vzniká, pokud je na kondenzátor připojeno dostatečně vysoké elektrické napětí. Proto bude následující kapitola zaměřena na možnosti, jak tuto malou sílu efektivně změřit a určit závislost mezi naměřenou silou a připojeným napětím, popřípadě procházejícím proudem (z kapitoly 1.4. víme, že vznikající síla je úzce spojena jak s připojeným napětím, tak i s procházejícím proudem). Jelikož metody na měření proudu a napětí jsou již mnohokrát popsány a vyzkoušeny, není třeba je zde podrobně popisovat. Ovšem měření vznikající síly lze kvůli podmínkám, ve kterých je nutné ji měřit, považovat za ne zcela standardní. Důvodem je například přítomnost vysokého napětí nebo nutnost měnit tvar kondenzátoru. V literatuře publikované na toto téma je možné nalézt mnoho rozličných a různě účinných postupů na měření vznikající síly, a proto bude hlavní náplní této kapitoly nalezení neoptimálnější metody na změření síly vznikající na kondenzátoru a vyřešení její následné praktické aplikace na vlastní měření.

3. 1. Metody měření

Hodnoty síly vznikající na kondenzátoru s asymetrickými elektrodami, které budeme měřit, se pohybují v řádu mN. Je tedy nutné použít metodu měření, která bude dostatečně přesná, aby byla schopná malou sílu plně zachytit a kvantifikovat. Situaci nám také komplikuje přítomnost vysokého napětí, která je pro vznik síly nutností. Dostáváme se tedy do situace, kdy se snažíme změřit relativně malou změnu mechanické veličiny, aniž bychom použili citlivou elektroniku, která by mohla být v průběhu měření ovlivněna, nebo dokonce poškozena elektrickým polem přítomným na měřeném přípravku. Další možností ovšem je, pokud bychom se bez citlivého elektronického měřicího přístroje nedokázali obejít, použít takovou metodu, která by dokázala přenést s dostatečnou přesností informaci o změně mechanické veličiny na dostatečnou vzdálenost, aby elektrické pole měřicímu přístroji neublížilo.

Podíváme-li se na práce, které se měřením síly vznikající na asymetrickém kondenzátoru zabývali před námi, zjistíme, že metody měření, které v nich byly využívány, jsou převážně dvě:

- *Rotační uspořádání „ACT“* – Model, který používal například Francis Canning a který v jednom ze svých patentů navrhl již T. T. Brown (viz obr. 5), se skládá

z dvojce vzájemně izolovaných asymetrických kondenzátorů obrácených proti sobě. Kondenzátory jsou upevněných na opačných koncích společného horizontálního ramena tak, že pokud se rameno ve svém středu připevní na vertikální otočnou osu, kondenzátory na rameni budou společně vytvářet dvojici sil se stejně orientovaným momentem síly.

Vznikající síla je na ACT měřena nepřímo jako počet otáček rotoru za čas. Tento fakt s sebou nese mnoho potíží. Výsledná rychlost otáčení je charakterizována součtem momentů sil, z nichž jeden je tvořen odporovou silou okolního prostředí, druhý je tvořen silou třecí, která působí v ložiscích, a třetí je tvořen silou vznikající na kondenzátorech. Obě síly působící proti směru pohybu, tedy síla odporová a třecí, závisí na rychlosti otáčení. Právě až po nastolení rovnovážného stavu při součtu všech tří momentů sil můžeme naměřit výsledný počet otáček za čas. To nám tedy sice dá jistou informaci o vznikající síle, ovšem vzhledem k množství dalších parametrů, které bychom museli vyjádřit a započítat, není z naměřené rychlosti otáčení rotoru (v reálném případě) téměř možné získat původní hodnotu zkoumané síly. S tímto problémem si ale většina výzkumníků poradila tak, že při změnách parametrů (napětí, tvar elektrod ...) porovnávali mezi sebou pouze naměřenou rychlost, a již se nezabývali přepočtem na sílu. Tyto závěry mohou být ale vzhledem k měněným parametrům značně diskutabilní. Vliv na odporovou sílu a tedy na výsledný počet otáček může mít změna kolmého průřezu kondenzátorů při změně tvaru elektrod nebo například hustota okolního plynu při měření za sníženého tlaku. Dokonce i změna hmotnosti kondenzátorů a tedy i celého rotoru může zvýšit tření v ložiscích, a následně zcela znemožnit srovnání výsledku měření s výsledky získanými pro jinak těžké kondenzátory.

Navíc tento design vyžaduje vyřešení několika konstrukčních problémů. Prvním je realizace přívodů vysokého napětí na oba kondenzátory. Protože jsou oba na rotující ose, je jedinou možností, jak na ně přivést oba póly vysokého napětí, využít ukotvení osy v ložiscích. To tedy musí být kontaktní a zároveň vodivé. Dále je nutné zajistit totožnost obou kondenzátorů tvořících silovou dvojici. Hmotnostní rozdíl může způsobit nevyváženost a výrazně zvýšit tření. Nehledě na to, že ložiska sama je třeba dimenzovat tak, aby osa byla co nejstabilnější, ale vlastní odporová síla v ložiscích co nejmenší. Tvarový rozdíl

naopak devaluje výsledek měření proto, že nelze s jistotou říci, jak se na výsledné síle podílel jeden nebo druhý kondenzátor.

Všechny tyto podmínky omezují průběh měření a činí přípravy na ně příliš složité. Změna tvarů kondenzátorů by v případě použití ACT znamenala vytvoření ne jednoho, ale vždy dvou totožných přípravků.

- *Měření rychlosti proudění vzduchu* – Řekli jsme, že síla vzniká vlivem srážek nabitých částic s částicemi neutrálními. Ty nás zatím zajímaly pouze jako prostředek, jak alespoň část hybnosti nabitých částic předat zpět kondenzátoru. Někdy se ovšem zapomíná, že stejnou hybnost, která je po srážce částic přenesena na elektrody, odnáší také neutrální částice. Vzhledem k obrovskému celkovému počtu srážek vzniká kontinuální proud vzduchu. Tím se nám naskýtá možnost zkoumat vznikající sílu prostřednictvím měření rychlosti tohoto proudění. Metod, jak rychlost proudění tekutého média měřit existuje velké množství. Nejčastěji se v této souvislosti používají buď optické metody, které nevyžadují, aby jakákoliv část měřicího přístroje zasahovala do měřené oblasti, nebo jednoduché termoanemometrické sondy.

Z optických metod jsou nejběžnějšími metodami metody LDA (Laser Doppler Anemometry) a PIV (Particle Image Velocimetry). Metoda LDA funguje na principu Dopplerova jevu. Základem je laserový paprsek, který je z důvodu koherence rozdělen na dva. Ty spolu ve zkoumané oblasti interferují a vlivem Dopplerova jevu zde dochází k posuvu frekvence paprsku odraženého od procházejících částic, a jejím porovnáním se známou frekvencí vyslaného signálu lze vypočítat rychlost částice. Je tedy zřejmé, že je pro tuto metodu nutná přítomnost částic určité velikosti ve zkoumaném proudění, samozřejmě také průhlednost proudící tekutiny a optický přístup k vlastní tekutině. Částice vhodné velikosti lze do tekutiny dopovat uměle, jen je potřeba zajistit, aby měly velmi malou pádovou rychlost a aby byly schopné kopírovat trajektorie proudu tekutiny. Velikost částic nutných pro tuto metodu závisí na vlnové délce použitého zdroje světla. Toho lze využít například pokud chceme získat třídimenzionální vektor proudění. Stačí nám k tomu tři zdroje světla o různých vlnových délkách a částice o patřičných průměrech.

Metoda PIV využívá obdobně jako metoda LDA laser jako zdroj světla. Při aplikaci PIV je ovšem účelem laseru pouze osvětlit zkoumanou plochu (laserový

paprsek je opticky roztažen na plochu). I v této metodě je proud tekutiny nadopován trasovacími částicemi, které nám umožňují sledovat její pohyb. Nakonec je osvětlený prostor minimálně dvakrát rychle za sebou nasnímán kamerou umístěnou kolmo na osvětlenou plochu. Jedná se většinou o rychlokamery s vysokou vzorkovací frekvencí. Protože je znám čas mezi snímky, je pak již jen záležitostí softwaru aby porovnal posunutí vyfotografovaných částic na snímku a určil tak směr a rychlost jejich pohybu. Dostaneme tak dvojdimenzionální obraz s vykresleným polem vektorů, jejichž směr nám udává směr proudění v daném místě a velikost vektorů reprezentuje velikost rychlosti proudění. Je možné upravit snímací a osvětlovací aparaturu, abychom získali až třídimenzionální záznam proudění. Vyhodnocování takovýchto snímků je však velmi náročné.

Naopak kontaktní metoda měření využívající například termoanemometrické sondy staví na závislosti velikosti elektrického odporu většiny kovů na jejich teplotě. V sondě je umístěný vnějšmu prostředí otevřený velmi tenký kovový drátek (průměr až v řádu mikrometrů, nejčastěji wolfram), který je žhaven elektrickým proudem na teplotu vyšší, než je teplota okolního vzduchu. Vzduch proudící kolem drátku jej ochlazuje, a tak mění jeho vlastnosti. Lze najít závislost mezi elektrickým odporem a rychlostí proudění.

Z popisů jednotlivých metod vyplývá například velká výhoda metody PIV proti ostatním měřicím metodám. Výstupem jednoho měření za použití měřicí metody PIV je totiž vektorové pole, tedy údaj o směru a velikosti rychlosti v mnoha bodech zkoumané oblasti. Tak dostaneme celkový a podrobný obraz proudění v celé ploše zkoumané oblasti (uvažujeme-li jednodušší měření ve 2D). Tento výsledek je velice užitečný, zajímá-li nás nejen vlastní rychlost ale hlavně komplexní pohled na tvar proudění.

Toho by za použití ostatních metod, které udávají pouze velikosti rychlosti ve velmi omezené oblasti, nebo dokonce v jednom bodě (například termoanemometrická sonda), bylo možné dosáhnout pouze pokud bychom vytvořili pole senzorů. I tak bychom potřebovali minimálně tři měření s různou orientací senzorů upravených tak, aby snímaly rychlost proudění pouze v jednom směru, abychom získali i směrovou složku proudění. Stejně bychom byli omezeni na body, ve kterých jsou senzory umístěny.

Zmíněné bezkontaktní metody mají proti metodám kontaktním ještě jednu významnou výhodu. Protože nepotřebují pro svou aplikaci žádný senzor nebo jakoukoliv část zařízení zasahující do zkoumané oblasti, jejich využití prakticky neovlivní zkoumané proudění.

Naopak výhodou termoanemometrické sondy proti optickým metodám je jednoduchost její aplikace. Nevyžaduje totiž žádný složitý měřicí setup a je možné s celým přístrojem snadno manipulovat. Manipulace s částmi měřicího zařízení pro metodu PIV nebo LDA může být dokonce nebezpečná z důvodu přítomnosti laseru.

Ať už je použita jakákoliv měřicí metoda, měření rychlosti proudění vzduchu má stejně jako měření rychlosti otáček modelu ACT několik omezení. Protože se opět jedná o nepřímé měření, hodnoty rychlosti proudění nemusí přesně korespondovat s generovanou silou.

Prvním problémem je, kde rychlost proudění měřit. Pokud bychom totiž využili měřicí přístroj, který je schopen změřit hodnotu rychlosti proudění pouze v jednom bodě (popřípadě hodnoty rychlosti proudění v oblasti o rozměrech výrazně menších než jsou rozměry měřených přípravků), musíme zvolit bod v okolí měřeného přípravku, který bude mít stejné vlastnosti (z hlediska proudění) pro všechny varianty přípravků. Pouze pokud bychom takovýto bod našli a měření prováděli v něm, můžeme výsledné hodnoty vzájemně porovnávat. Zde ale narážíme na obdobný problém jako u modelu ACT. Protože se budou jednotlivé rozměry přípravků v rámci měření měnit, nalezení bodu, ve kterém by bylo možné provádět všechna měření pro všechny přípravky, je prakticky nemožné.

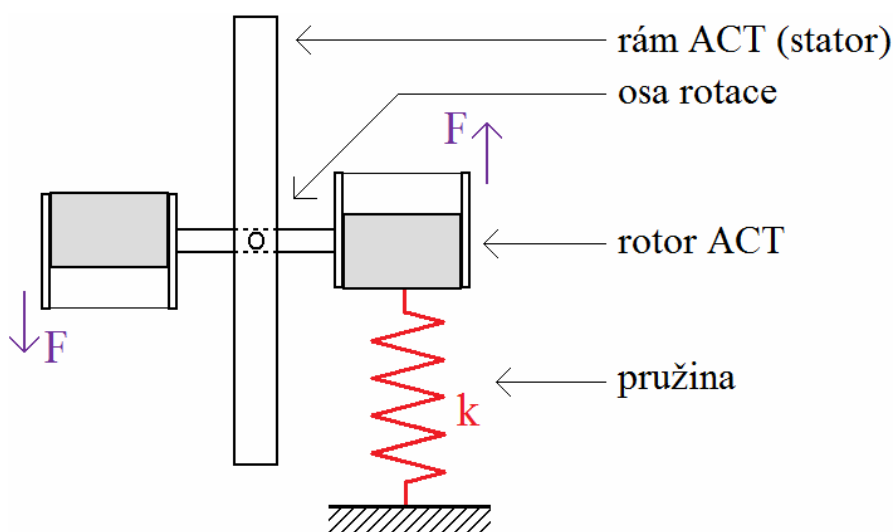
Z tohoto důvodu je velice důležité při měření používat metody, které nám budou podávat co nejkomplexnější a nejúplnější obraz o rychlostech a směrech proudění. Ovšem vyhodnocování takového množství hodnot tak, aby bylo opět možné výsledky měření na jednotlivých přípravcích srovnávat, je značně komplikované. Bylo by samozřejmě možné porovnávat pouze maximální rychlosti. Změna obtékaného tvaru se ale může projevit výraznou změnou v charakteristice proudění a tedy i rozložení rychlostního pole. To znamená, že pouze údaj o maximální rychlosti naměřený u přípravku nám proudění u daného přípravku necharakterizuje. Změna tvaru zkoumaného přípravku nám totiž může

ovlivnit nejen velikost zkoumané síly, která proudění vyvolává a kterou se snažíme změřit, ale také směr a velikost vlastního proudění ať už negativně (zvýšení odporových sil), nebo pozitivně (např. zmenšení průřezu při zachování objemového průtoku – což způsobí zvýšení výsledné rychlosti).

Druhou možností je vyhodnocovat rychlosti proudění ve vybrané hladině integračně. Omezí se tak sice vliv lokálních chyb, ale znovu je tu problém výběru a určení hranic hladiny (tedy roviny, ve které se hodnoty rychlosti nasčítají).

Vhodnost tohoto způsobu měření efektivity přípravků generujících sílu je tedy diskutabilní. Pokud by bylo cílem zkoumat tento jev s ohledem na intenzitu vytvářeného proudění vzduchu, byl by tento postup ideální. Cílem této práce je ale prozkoumat vliv tvaru kondenzátoru na velikost generované síly. Je tedy nutné přijít s metodou, která již nebude sílu měřit nepřímou přes veličiny, ze kterých ji jen obtížně dopočteme, ale takovou, která měří přímo vznikající sílu na stacionárním kondenzátoru.

- *Stacionární měření síly* – Jednou z možností, jak měřit přímo generovanou sílu, je využít již popsany model ACT a spojit rotor s pevným bodem v okolí popřípadě se statorem prostřednictvím siloměru (Obr. 15). Rotor, který je takto upevněn, se místo otáčení pouze vychýlí tak, jak mu dovolí pružina siloměru. Podle výchylky ramen rotoru, popřípadě podle protažení pružiny lze určit generovanou sílu.



Obr. 15: Schéma modelu ACT – rotor připojený na pružinu s definovanou tuhostí

Nevýhodou této metody je fakt, že ačkoliv je v klidové poloze směr vznikající síly na připojené polovině rotoru totožný s osou siloměru, po připojení na vysoké napětí, ve chvíli kdy síla začne být generována se celá soustava vychýlí. Vznikající síla působí vždy ve směru tečny kružnice se středem ležícím na ose otáčení rotoru ACT. V případě, že je síla generovaná dvojicí kondenzátorů dostatečná na natažení pružiny siloměru, tedy je měřitelná, rotor ACT se pootočí do takové polohy, ve které je zachována dynamická rovnováha – generovaná síla na jedné straně a reakční síla způsobená tuhostí napínané pružiny na straně druhé. Ovšem síla, která je takto naměřená, je menší než síla skutečně generovaná. Důvodem je právě rotační pohyb kondenzátorů. Síla napínající pružinu ve vyrovnaném stavu již totiž nepůsobí ve stejném směru jako je osa napínané pružiny. Samozřejmě je možné tento problém vyřešit změřením všech úhlů (jak úhlový rozdíl osy napnuté pružiny od své počáteční polohy, tak i úhel vychýlení rotoru ACT) a přepočtem síly pomocí goniometrických funkcí. Znamená to ale opět měřit místo jedné veličiny tři, tedy naměřenou sílu a oba úhly.

Při praktické realizaci se nelze vyhnout i několika problémům. Protože velikost vznikající síly se pohybuje v řádu mN, mají na její měření vliv i takové veličiny, jako je hmotnost napínané pružiny. Může totiž dojít k jejímu prověšení, a tak dojde k zneřecnění odečtu naměřené síly, a tedy invalidaci celého měření. Stejně tak bude zatížena jedna polovina rotoru ACT přidanou hmotností a může dojít k výraznému nárůstu odporové síly v ložiscích, ve kterých je rotor uložen.

Většina nevýhod komentovaných na začátku této kapitoly u popisu měření rychlosti otáčení modelu ACT byla zachována i u této téměř stacionární měřicí metody. Ať už se jedná o možnost nevyvážení nebo o konstrukční potíže.

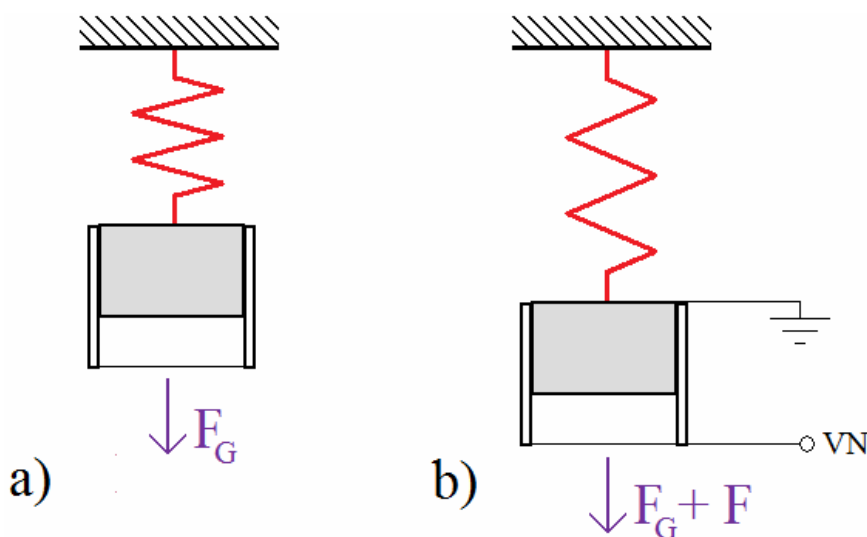
Z toho jasně vyplývá, že při návrhu měřicí metody se musíme držet několika bodů:

- *Bude-li v průběhu měření docházet k pohybu kondenzátoru, nechť je to pohyb translační a nikoliv rotační.*
- *Síla měřená na kondenzátoru nechť má směr vertikální a nikoliv horizontální. Omezí se tak vliv gravitační síly na případné odporové síly.*
- *Měřicí metoda musí být zvolena tak, aby k určení celé vznikající síly nebylo třeba měřit více než jednu veličinu.*

- Je nutné zajistit, aby vznikající síla byla na měřicí zařízení přenesena celá.
- Měřená síla musí po celou dobu měření zachovávat směr rovnoběžný s předepsaným směrem měření měřicí aparatury.
- Při jednom měření musí být měřen pouze jeden kondenzátor.

Pokud se budeme držet těchto bodů, které jsme si vytvořili, vyjde nám měřicí metoda, při které je jeden kondenzátor orientován vertikálně tak, že vznikající síla působí nahoru, nebo dolů. Kondenzátor je v této poloze postaven, nebo zavěšen na měřicí přístroj, který je schopen změřit sílu buď přímo, nebo nepřímo ale s jednoduchým přepočtem.

Jednou z možností je zavěšovat kondenzátor kolmo dolů na jeden, popřípadě několik (z důvodu stability zavěšení a nosnosti pružin) siloměrů. Následně můžeme sílu změřit jako posunutí ve směru svislé osy, tedy jako rozdíl naměřené síly působící na měřicí zařízení v klidové poloze (pouze síla gravitační) a síly naměřené po připojení vysokého napětí (viz obr. 16). Nová hodnota síly může být vyšší, nebo nižší, v závislosti na orientaci vznikající síly. Pakliže je vznikající síla orientovaná dolů, výsledně naměřená síla bude součtem obou sil. V opačném případě bude naměřen rozdíl gravitační síly působící na kondenzátor a vznikající síly.



Obr. 16: Kondenzátor zavěšený na siloměru a) v klidovém stavu za působení pouze gravitační síly F_G a b) po připojení vysokého napětí, kdy se vznikající síla F a gravitační síla F_G sčítají.

Ačkoliv se tato metoda zdá být pro naše účely téměř ideální, stále existují jisté její nevýhody, které by mohly měření znepráchnit. Jednou z nich je relativně malá citlivost klasických siloměrů, uvážíme-li, že síla vznikající na kondenzátoru je v řádu mN. Druhou nevýhodou je relativní nestabilita metody zavěšování. Celý systém je náchylný ke kývání do stran ať už vlivem proudění vzduchu v místnosti nebo mírnou asymetrií v upevnění závěsu. Naměřené hodnoty by pak obsahovaly i případné výchylky. Jakékoliv pokusy o stabilizaci by naopak znesnadňovaly vyhodnocení měření, neboť by působily jako odporová síla s nepředvídatelnými účinky. Nehledě na to, že umístěním jakéhokoliv dalšího předmětu do elektrického pole kolem elektrod kondenzátoru by mohlo mít opět nepředvídatelný vliv na naměřenou veličinu.

Jedna z možností, jak tuto nestabilitu vyřešit, by byla využít závěsu na více pružin (3-4). Tím by se značně omezily možné výkyvy kondenzátoru do stran. Toto řešení má ale opět svá negativa. Například by bylo nutné zajistit nejen stejnou délku všech použitých pružin (aby nedošlo k vychýlení kondenzátoru a tak i změny směru měřené síly), ale i zajistit jejich stejnou tuhost.

Pokud tedy vyloučíme metodu závěsu, poslední možností je využít měřicí přístroj, na který by bylo možné kondenzátor stavět. Tím se omezí jakékoliv problémy s pohybem kondenzátoru.

3. 2. Zvolená metoda měření - vážení

Pro tyto účely byla jako měřicí přístroj vybrána přesná digitální váha. Kondenzátor bude na váze umístěn opět do vertikální polohy, a protože se jedná o vážení na základě piezoelektrického jevu, při kterém je výchylka při zatížení téměř zanedbatelná, bude i problém pohybu nebo vychýlení kondenzátoru vyřešen.

Při aplikaci této měřicí metody budeme měřit změnu hmotnosti kondenzátoru (rozdíl hmotností před a po připojení vysokého napětí), a díky vertikálnímu směru působení vznikající síly ji můžeme získat jednoduchým přepočtem z hmotnosti:

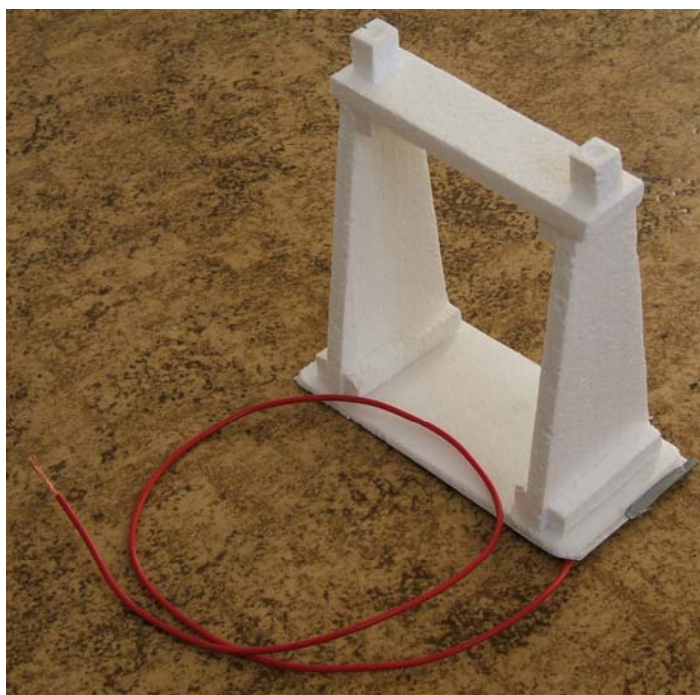
$$F = g \cdot (m - m_0) = g \cdot \Delta m, \quad (7)$$

kde F je síla vznikající na kondenzátoru, g je konstanta gravitačního zrychlení (pro jednoduchost uvažujeme $g = 9,81$), Δm je změna hmotnosti, tj. rozdíl naměřené hmotnosti v

klidovém stavu m_0 a hmotnosti po připojení vysokého napětí m . Protože nám digitální váha umožní vynulovat hodnotu m_0 , budeme opravdu měřit pouze jednu hodnotu – tedy Δm .

Posledním problémem se může jevit přítomnost elektrického pole kolem kondenzátoru v blízkosti citlivé elektroniky váhy, to lze ale vyřešit umístěním stojanu z izolujícího materiálu mezi váhu a vlastní kondenzátor. Stojan tedy umístíme na misku váhy a kondenzátor postavíme na stojan. Síla tedy bude přenesena na misku váhy, aniž by musel být kondenzátor v přímém kontaktu s váhou.

Z důvodu omezené váživosti váhy a s ohledem na hmotnostní rezervu vyhrazenou pro různé typy kondenzátorů musí být stojan velice lehký a přesto natolik rozměrný, aby sloužil zvětšení vzdálenosti mezi kondenzátorem a váhou, ale také dostatečně pevný, aby mohl fungovat jako opora kondenzátoru, který na něj bude upevněn. V tomto směru optimálním materiálem se jeví polystyren. Byl tedy postaven polystyrenový stojan splňující všechny na něj kladené podmínky (viz obr. 17). Pro zvýšení bezpečnosti byla na spodní stranu stojanu přilepena aluminiová fólie, která bude během měření uzemněná. Tím se zajistí dostatečná ochrana váhy před poškozením.



Obr. 17: Polystyrenový stojan se zemnicím kabelem

3. 3. Zkoumaný kondenzátor

Protože je mým úkolem v této práci popsat závislost mezi mechanickými změnami kondenzátoru s asymetrickými elektrodami a silou na něm vznikající, je potřeba vybrat základní tvar kondenzátoru tak, aby na něm bylo možné snadno měnit zvolené parametry. Je nutné zajistit, aby při změně jednoho parametru nedošlo ke změně parametrů dalších. Tím by byly jakékoliv pozorované závislosti téměř nezhodnotitelné.

Za základní tvar bude tedy považován design kondenzátoru, ve kterém malou elektrodu tvoří tenký měděný drát napnutý nad polystyrénovým (z důvodu malé hmotnosti a relativně snadné výroby) kvádrem potaženým aluminiovou folií, který tak tvoří elektrodu velkou. Pro tento typ kondenzátoru se při experimentech vžil termín *element*. Jedná se totiž o základní stavební jednotku většiny obecně používaných modelů asymetrických kondenzátorů. Model lifter se skládá z několika elementů, které společně tvoří n-úhelník (viz obr. 2). Stejně tak rotor modelu ACT (viz obr. 3) se skládá ze dvou opačně orientovaných elementů.



Obr. 18: Základní design kondenzátoru - element

Tabulka 1: Výchozí parametry elementu

	základní rozměr [mm]	značka
průměr malé elektrody	0,1	p
vzdálenost elektrod	30	d
délka velké elektrody	100	a
výška velké elektrody	50	b
šířka velké elektrody	10	c

Základní rozměry elementu byly vybrány tak, aby korespondovaly s rozměry již zmiňovaných fungujících modelů ACT a lifteru. Výrazně největším rozměrem je i zde délka kondenzátoru, zatímco nejmenší rozměr velké elektrody je její šířka. Stejně tak jsou i všechny rozměry velké elektrody výrazně větší v porovnání s malou drátovou elektrodou (viz obr. 18).

Aby bylo možné napnout malou drátovou elektrodu v konstantní vzdálenosti nad elektrodu velkou, je nutné obě elektrody spojit tzv. distančními sloupky. Rozumí se tím dvě tyčky (v našem případě válce) z izolačního materiálu, které jsou pevně připojeny k velké elektrodě a mezi nimiž je v dané vzdálenosti natažena elektroda malá.

Ačkoliv to není na první pohled zcela zřejmé, materiál těchto sloupků může mít velký vliv na efektivitu procesu generujícího sílu na asymetrickém kondenzátoru. Mnoho výzkumníků používalo při stavbě asymetrických kondenzátorů distanční sloupky dřevěné. Dřevo je totiž obvykle považováno za materiál s uspokojivými izolačními vlastnostmi, nehledě na několik dalších důvodů pro jeho použití. Jako materiál je dostupné v mnoha formách a s mnoha různými vlastnostmi. Práce s ním je snadná a nevyžaduje žádné speciální nástroje. Ale pravděpodobně nejdůležitějším důvodem, proč je dřevo při zhotovování distančních sloupků stále používáno, je fakt, že lehké druhy dřeva (např. balza) využívá většina nadšenců při stavbě modelů lifter.

Z experimentálních výsledků v publikaci „Influence of the insulating material on current efficiency and force on a high voltage capacitor with asymmetrical electrodes“ (Vliv izolačního materiálu na proudovou spotřebu a na sílu na vysokonapětovém kondenzátoru s asymetrickými elektrodami) [19] vyplývá, že dřevo, kvůli svým vlastnostem jako je navlhavost, umožňuje průchodu elektrického proudu distančními sloupky, a tak se část energie vložené do kondenzátoru ztratí bez jakéhokoliv přispění ke vznikající síle. Při snížení odporu sloupků, např. právě zvýšením objemového podílu vody v nich, se zvýší ta část proudu, která neprochází aktivní oblastí kondenzátoru (vzduchovou mezerou mezi elektrodami), a tak pro vygenerování stejné síly je zapotřebí většího proudu.

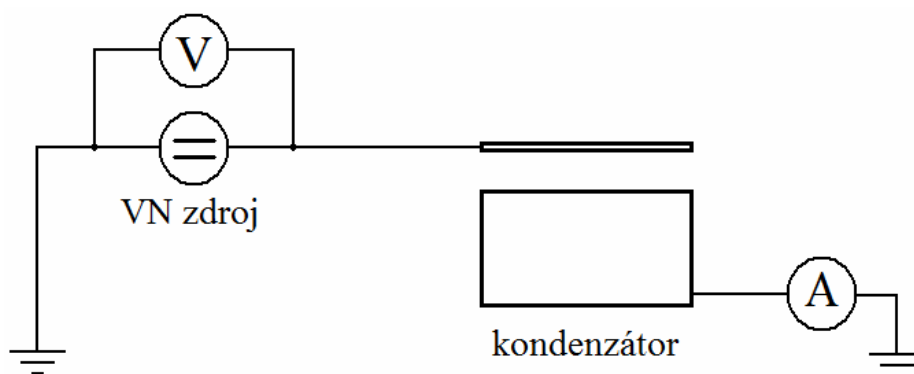
Právě náchylnost na absorpci vzdušné vlhkosti činí ze dřeva velice nevhodný materiál pro distanční sloupky. Důvodem ovšem není jen větší proudová spotřeba kondenzátoru, ačkoliv sám tento fakt je již výmluvným argumentem, ale také obtížná opakovatelnost experimentů při odlišných atmosférických podmínkách (vlhkost vzduchu).

V článku [19] bylo provedeno srovnávací měření s použitím distančních sloupků z různých materiálů. Kromě dřeva bylo pro výrobu sloupků použito i několik druhů plastů a

sklo. Materiálem s nejlepšími vlastnostmi se ukázalo být podle očekávání právě sklo, a proto byl tento materiál použit na výrobu distančních sloupků i v této práci.

3. 4. Měřicí sestava a postup měření

Metodu měření síly vznikající na asymetrickém kondenzátoru jsme si již zvolili. K realizaci měření je ale zapotřebí kromě váhy a samozřejmě zdroje vysokého napětí několik dalších měřicích zařízení, aby bylo možné stanovovat závislosti a porovnávat naměřené výsledky. Ačkoliv je cílem této práce popsat vliv mechanických veličin na vznikající sílu, pro potřeby měření je nutné měřit jak protékající proud, tak napětí na elektrodách kondenzátoru. Měřicí sestava kolem asymetrického kondenzátoru je tedy zapojena jako velice jednoduchý elektrický obvod (viz obr. 19). Protože cílem této práce není popsat elektrické závislosti ani elektrické parametry, které mohou mít vliv na vznikající sílu, toto zapojení (samozřejmě s výjimkou vlastního kondenzátoru) zůstane nezměněno pro všechna prováděná měření.



Obr. 19: Schéma elektrického zapojení asymetrického kondenzátoru v průběhu měření

Zdroj vysokého napětí je připojen na malou elektrodu, přičemž napětí na něm je měřeno paralelně připojeným voltmetrem. Velká elektroda je naopak uzemněná a uzavírá tak obvod. Procházející proud je měřen až v uzemněné části za velkou elektrodou kondenzátoru proto, aby byl ampérmetr ochráněn před vysokým napětím. Tím je také zajištěno, že bude změřen opravdu jen proud, který projde asymetrickým kondenzátorem.

Jako zdroj vysokého napětí je používán zdroj Glassman FX Series. Je schopný dodávat kladné vysoké napětí v rozsahu 0 – 50 kV při proudech až do 6 mA. Při použití zdroje je také možné nastavit proudovou ochranu, tedy hodnotu procházejícího proudu, při jejímž překročení zdroj okamžitě odpojí výstup. Tato funkce slouží k zamezení zažehnutí obloukového výboje a poškození jak zdroje tak ostatního vybavení (v průběhu většiny měření

byla proudová ochrana zdroje nastavena na hodnotu 4 mA). Zdroj je vybaven vestavěnými digitálními měřicími přístroji schopnými měřit a zobrazit hodnotu dodávaného napětí (s rozlišením na desetiny kV) a proudu (s rozlišením na desetiny mA).

Pro naše účel je rozlišovací schopnost voltmetru ve zdroji dostatečná, ale protože se proud při mnoha experimentech pohybuje v jednotkách až desítkách μA , je nutné proud měřit externě. K tomuto účelu slouží multimetr Agilent U1252B přepnutý na rozsah μA .

Posledním s použitých přístrojů je digitální váha Kern PEJ 620-3M. Jedná se o velmi přesnou váhu s váživostí 620g, což poskytuje velice širokou rezervu v případě nutnosti vážení rozměrnějších přípravků, a rozlišením 0,001g, přičemž poslední digit má pouze orientační funkci.

Vlastní postup měření je opět shodný pro všechna následující měření. Měřený asymetrický kondenzátor je umístěn na stojan, který je následně postaven na váhu. Spodní strana stojanu je uzemněna. Malá elektroda kondenzátoru je připojena na výstup vysokonapětového zdroje a velká elektroda je uzemněna přes multimetr přepnutý na měření proudu. Všechny přívody vedoucí na vážený přípravek musí být z tenkého a snadno ohebného drátu, aby neovlivnily hodnotu naměřené síly svou hmotností a ohybovou tuhostí.

Ještě dříve než je zdroj vysokého napětí zapnut, je display váhy vynulován. Tak je naměřená hodnota opravdu jen Δm , tedy vznikající silou vyvolaná změna hmotnosti. Naměřenou hodnotu lze následně snadno dosadit do vzorce (7).

Nyní již lze zapnout zdroj a pro jednotlivě nastavované hodnoty napětí odečítat proud procházející kondenzátorem, ale hlavně sílu na něm vznikající (jako změnu hmotnosti).

Zde bychom se měli zmínit krátce i o nejistotách prováděných měření. Při měření s vysokým napětím je obecně reprodukovatelnost kolem 10 % považována za velmi dobrou [20]. To je způsobeno tím, že výsledky měření jsou znatelně ovlivňovány kromě svodového odporu také množstvím vnějších faktorů, např. okolní teplotou, atmosférickým tlakem, vlhkostí vzduchu, atd. Tyto vlivy se s časem plynule mění, neboť jsou měření prováděna v laboratoři bez možnosti regulace okolních podmínek. Protože je pro potřeby této práce nutné porovnávat hodnoty, nebo alespoň tvary průběhů měřených veličin, je nutné najít způsob, jak nízkou reprodukovatelnost měření obejít. Aby se předešlo největším nepřesnostem v měřeních (tedy právě ovlivnění okolními podmínkami) je nutné měření, jejichž výsledky se měly vzájemně porovnávat, provést ve velmi krátkém čase (cca 20 - 40 minut). Tím je zajištěno, že tato série měření byla prováděna za stejných podmínek.

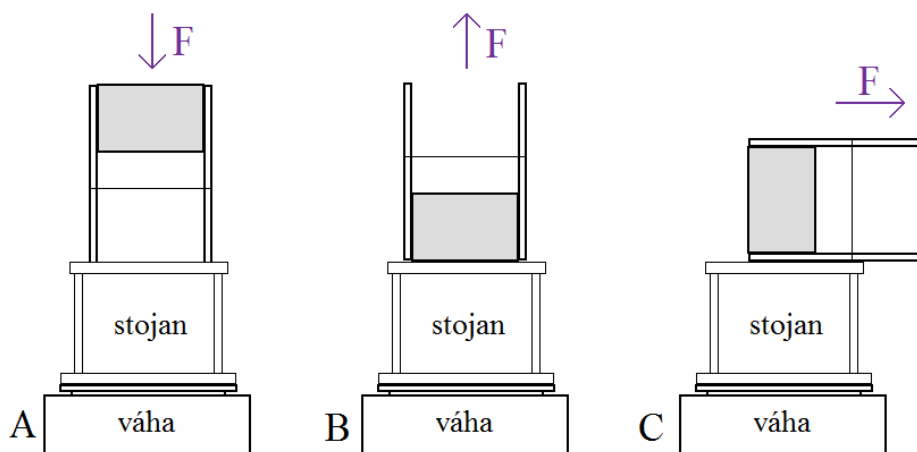
Statistické zpracování dat, které by v jiných případech přicházelo do úvahy, není vhodné aplikovat z několika důvodů. Provedení měření by v počtu dostatečném k tomu, aby se chyby statisticky eliminovaly, vedlo k extrémnímu zvětšení intervalu nepřesností. Nebylo by tak možné jednotlivé série měření porovnávat, protože oblasti vymezené jejich chybovými úsečkami by se prakticky překrývaly.

3. 5. Potvrzení měřicí metody a orientace měřeného kondenzátoru

První experimenty na této měřicí sestavě poslouží pro ověření funkčnosti zvolené měřicí metody. Dalším důvodem pro toto první měření bylo zjištění optimální orientace měřeného kondenzátoru. Problém netkví v samotném předpokládaném směru vznikající síly, ale v možnosti jak měřicí aparatura kolem kondenzátoru může ovlivňovat vznikající sílu, pakliže je na ní umístěn s různou orientací.

Protože je kondenzátor symetrický podle osy spojující obě elektrody, předpokládaný směr síly (vycházející z mnoha předchozích prací zmiňovaných již v řešerši – kapitola 1) je ve směru od větší elektrody k menší (kopírující kolmou spojnicí obou elektrod). Bude-li kondenzátor umístěn na váhu tak, že malá elektroda bude pod elektrodou velkou, váha by měla zaznamenat nárůst hmotnosti, protože vznikající síla bude působit dolů, kolmo na misku váhy. Při opačné orientaci váha musí zaznamenat úbytek hmotnosti, protože síla působí kolmo vzhůru, a tedy celou váženou sestavu nadlehčuje.

Byla připravena trojice měření, při nichž byla měněna orientace asymetrického kondenzátoru umístěného na váhu (viz obr. 20).

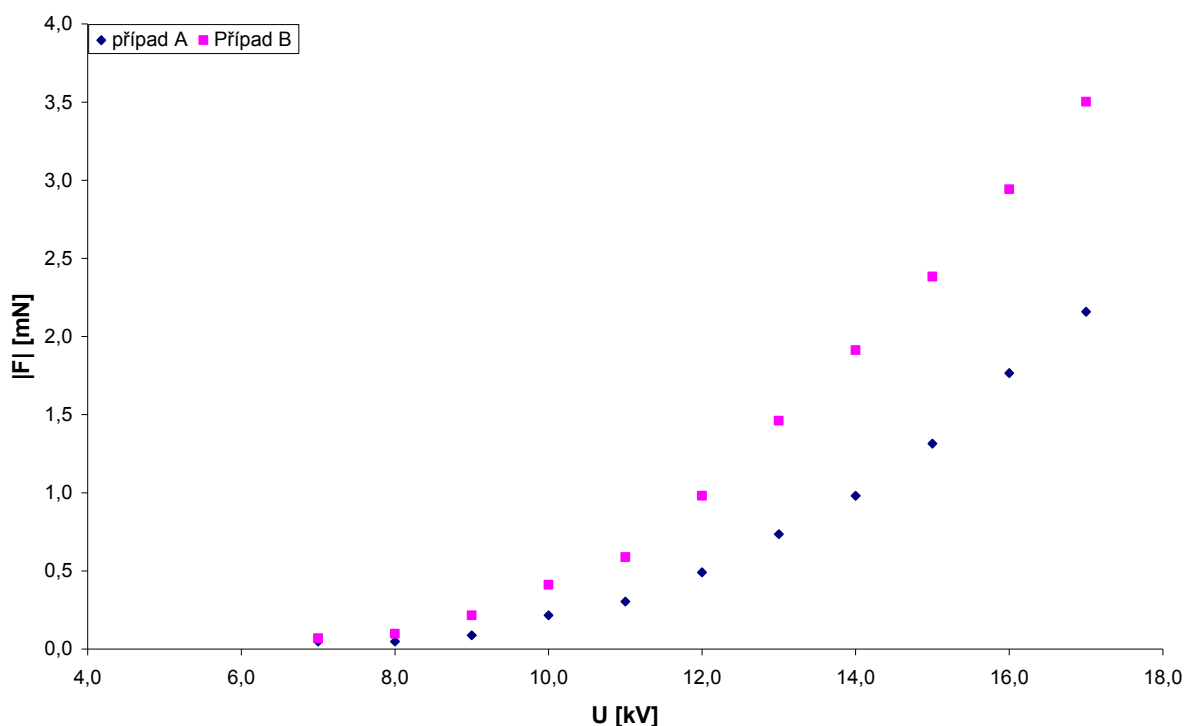


Obr. 20: Schéma měření pro různou orientaci kondenzátoru

V případě A stojí kondenzátor na svých distančních sloupcích, které jsou několikrát delší, než vyžaduje pouhá vzdálenost elektrod. Malá elektroda je přímo pod elektrodou velkou a vznikající síla směřuje dolů, čímž by měla způsobit přírůstek hmotnosti na váze. V případě B stojí kondenzátor přímo na své velké elektrodě, síla směřuje nahoru, a tak na váze způsobí úbytek hmotnosti. V případě C je kondenzátor postaven na boku a předpoklad je, že z důvodu horizontálního působení vznikající síly (kolmo na osu měřené veličiny) je její příspěvek k naměřené hmotnosti nulový. Pokud se tento předpoklad potvrdí, půjde o další důkaz, že teorie o elektrogravitaci [14] jako principu stojícím za vznikající silou jsou zcela nepodložené.

Po provedení měření na kondenzátoru se vzdáleností elektrod 30 mm se potvrdily všechny předpoklady o směru působící síly. Síla v případě C byla váhou opravdu nezaznamenána². Naopak měření pro případy A a B ukázalo rostoucí změnu hmotnosti (zápornou v případě B) s rostoucím napětím.

Existuje ale rozdíl ve velikosti naměřené síly pro případy A a B. Abychom je mohli porovnávat, byly do grafu vyneseny hodnoty síly v absolutní hodnotě (viz graf 1).



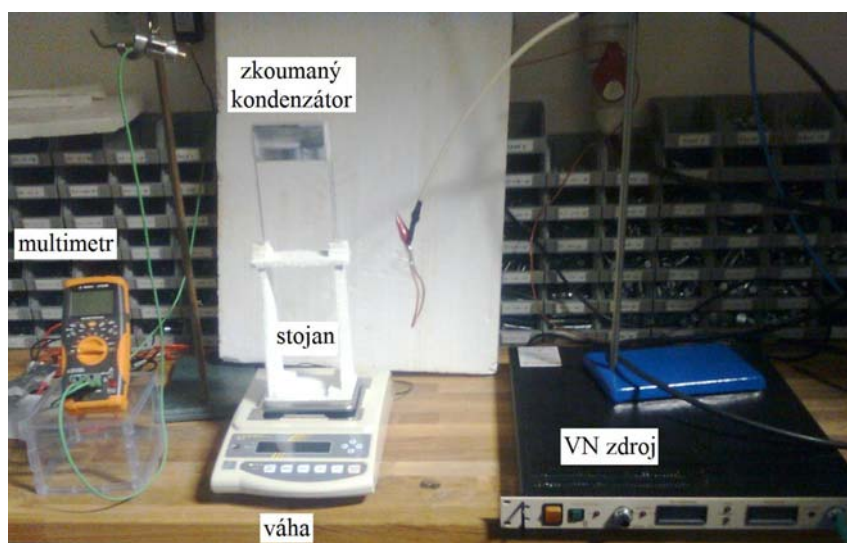
Graf 1: Závislost absolutní hodnoty vznikající síly $|F|$ na přivedeném napětí U pro dva různé případy orientace kondenzátoru na váze

² Pokud by mělo intenzivní elektrické pole být schopné i jen v malé míře ovlivnit přímo pole gravitační (které má předem definovaný a stále stejný směr), na orientaci zdroje elektrického pole by nemělo záležet.

Síla generovaná kondenzátorem se začala projevovat mezi 6 a 7 kV. S rostoucím napětím se zvyšoval i naměřený proud procházející kondenzátorem (pro oba případy stejně). To potvrzuje teoretická východiska z kapitoly 1. 4. S vyšším napětím se zvýší i míra ionizace kolem tenkého drátu, vzniká tedy více iontů přenášející náboj mezi elektrodami. Tím také naroste protékající proud a samozřejmě i síla, protože díky většímu počtu iontů dochází k většímu počtu srážek s neutrálními molekulami vzduchu.

Protože při zvyšování napětí rostl proud pro oba případy stejně, máme jistotu, že rozdíl mezi nimi není způsoben změnou principu, ale změnou v konečné fázi děje kolem kondenzátoru. Právě pohyb neutrálních molekul, které odnášejí hybnost získanou srážkami s nabitými částicemi, stojí za rozdílem naměřených hodnot síly mezi případy A a B. V případě A je prostor kolem celého kondenzátoru ale i nad velkou elektrodou volný. Neutrální molekuly vzduchu mají tedy možnost po srážce odletět mimo váženou sestavu a odnést svou hybnost pryč (viz obr. 10). Naopak v případě B je kondenzátor postaven svou velkou elektrodou na vrchní stranu stojanu, což zamezuje proudu vzduchu kolem elektrody. Část neutrálního „větru“, který v tomto případě směřuje převážně dolů, se tedy zastaví o stojan, a místo aby svou hybnost ztratil mimo váženou sestavu, přenesl ji zpět prostřednictvím stojanu na váhu. V důsledku tak váha změří pouze část vznikající síly.

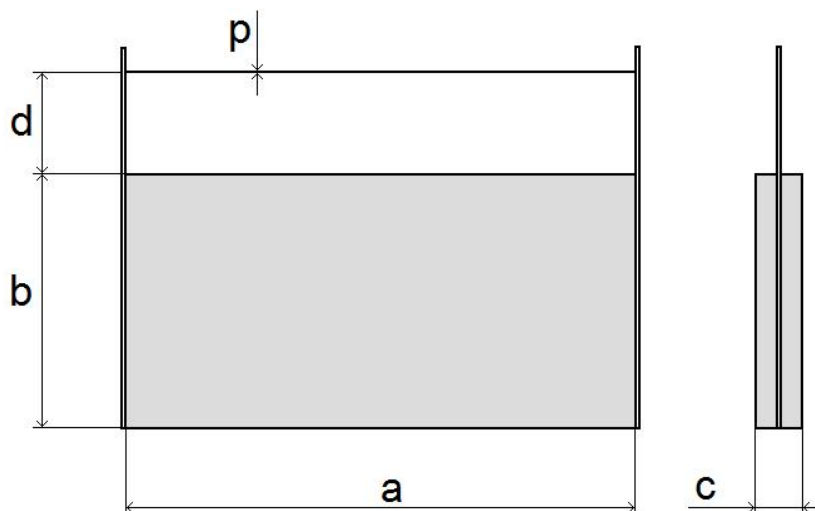
Přiblížíme-li ruku k uzemněné velké elektrodě (při zachování všech bezpečnostních pravidel při práci s VN), cítíme znatelný proud vzduchu. Tento fakt ukazuje na přítomnost diskutovaného proudění vyvolaného činností kondenzátoru. Z tohoto důvodu se podržíme orientace přípravků shodnou s případem A. Celý měřicí setup lze vidět na obr. 21.



Obr. 21: Fotografie použitého měřicího vybavení, orientace kondenzátoru je totožná s případem A – síla tedy míří dolů a je měřena jako přírůstek hmotnosti

4. Vliv rozměrů elementu

V této kapitole budou analyzovány vlivy změn jednotlivých rozměrů (a , b , c , d , p) na elementu (viz obr. 22), tedy kondenzátoru, který jsme si v minulé kapitole zvolili za základní.



Obr. 22: Schéma elementu s vyznačenými rozměry

Pro změnu tří rozměrů větší elektrody – délky a , výšky b a šířky c - bude nutno elementy daného tvaru vyrobit znovu. Změnu zbylých dvou rozměrů – vzdálenost elektrod d a průměr menší elektrody p – lze zajistit na původním elementu posunutím respektive výměnou drátu tvořícího menší elektrodu.

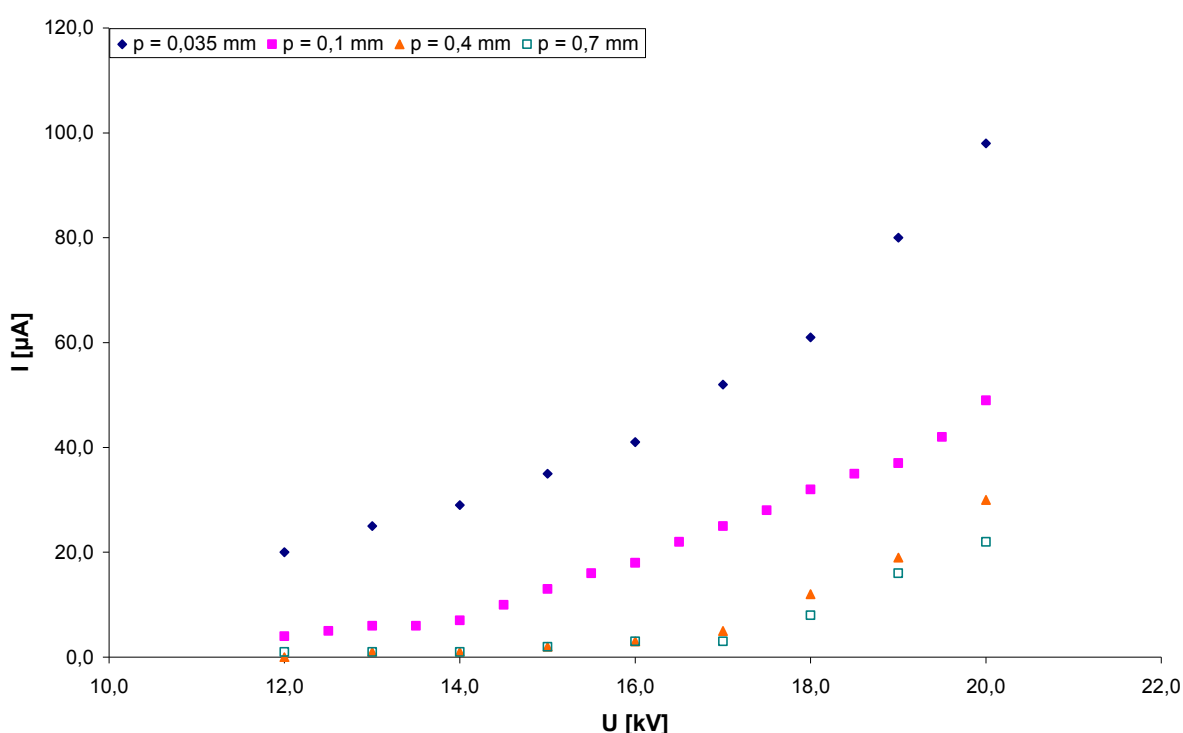
Změny jednotlivých rozměrů budou prováděny v okolí hodnot zvolených za základní (viz tabulka 1). Vliv změny jednotlivých parametrů se pokusím kvantifikovat prostřednictvím bezrozměrných koeficientů.

4. 1. Průměr malé elektrody

Z teorie předpokládáme, že účelem asymetrie kondenzátoru je primárně zajistit přítomnost nabitých částic v okolí kondenzátoru a zároveň zachovat pouze jeden preferovaný směr, kterým se budou v prostoru mezi elektrodami pohybovat. V jednoduchosti to tedy znamená, že chceme, aby nabitě částice vznikaly pouze kolem jedné elektrody a pohybovaly se ke druhé díky elektrickému poli mezi elektrodami. Symetrický kondenzátor, ať už jakéhokoliv tvaru, by tedy měl vykazovat nulovou vznikající sílu. To lze zdůvodnit dvěma způsoby. Buď budou obě elektrody takové, že intenzita elektrického pole kolem nich nebude dostatečná ke vzniku nabitých částic a nebude tedy docházet ke vzniku síly, nebo bude

intenzita elektrického pole kolem obou elektrod naopak dostatečná k ionizaci okolního prostředí. V tom případě vzniknou nabitě částice obou polarit kolem obou elektrod a začnou se pohybovat k opačně nabitým elektrodám (tedy na obě strany). Výsledkem bude stav, kdy je síla sice generována, ale protože se tak děje ve dvou opačných směrech, odečte se a výsledek bude minimální³.

Z toho tedy vyplývá požadavek co nejvyšší intenzity elektrického pole kolem malé elektrody jakožto zdroje ionizace a iontů. Protože víme, že vysoké intenzity elektrického pole lze dosáhnout pomocí zmenšení poloměru křivosti např. hran a hrotů, můžeme zajistit vysokou intenzitu kolem malé drátové elektrody tak, že snížíme její průměr.



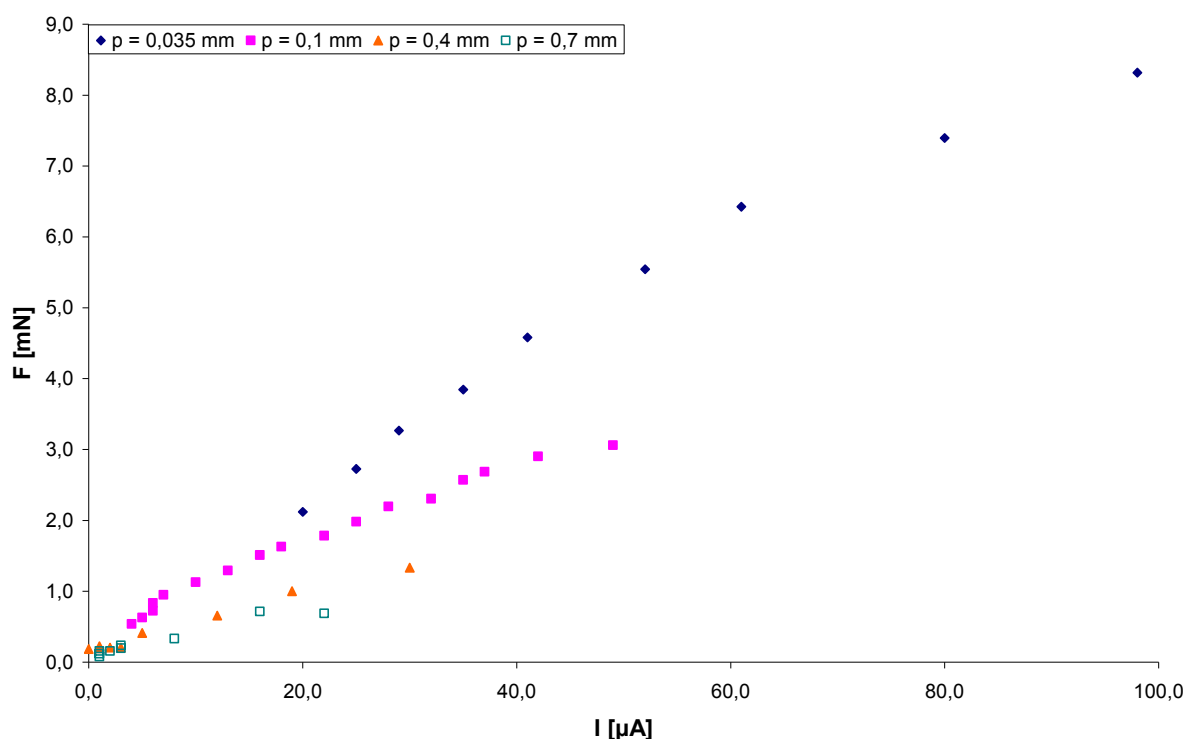
Graf 2: Závislost procházejícího proudu I na připojeném napětí U v rozsahu 12 kV – 20 kV pro různé průměry drátu malé elektrody

Při měření byla na kondenzátoru vyměňována pouze malá elektroda při zachování totožné velké elektrody a stejné vzdálenosti elektrod. Pro tyto účely posloužily holé dráty různého průměru. Nejmenší použitý průměr drátu byl 0,035 mm. Během měření působí na drátovou elektrodu množství sil. Mezi ně patří jak proudění okolního prostředí vyvolané pohybem nabitých částic, tak i jednotlivé příspěvky vznikající síly přenášené prostřednictvím elektrického pole na obě elektrody kondenzátoru. Působením těchto vlivů začíná malá

³ Vznikající síla není nulová, což je dáno rozdílem pohyblivostí kladných a záporných iontů.

elektroda v průběhu měření výrazně kmitat. Proto nebylo použito drátů s menším průměrem, neboť hrozí nebezpečí jeho přetržení nejen při manipulaci s ním, ale hlavně při vlastním měření. Přetržená část elektrody stále připojená na vysoké napětí by tak mohla způsobit při doteku s uzemněnou velkou elektrodou zkrat, a následné poškození použitých přístrojů.

Z grafu 2 je zřejmé, že při stejných hodnotách napětí je pro menší průměr drátové elektrody hodnota procházejícího proudu větší. To potvrzuje hypotézu, že kolem tenčího drátu bude větší intenzita elektrického pole, které způsobí silnější ionizaci, a tedy vznik více nabitých částic přenášejících náboj mezi elektrodami (elektrický proud). S větším počtem pohybujících se nabitých částic vzroste také vznikající síla, která je tímto pohybem generována.



Graf 3: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro různé průměry drátu malé elektrody při použitém napětí 12 kV – 20 kV

Zatím jsme rozdíly naměřené pro různé průměry malých elektrod přikládali pouze rozdílu v počtu nabitých částic vznikajících kolem malé elektrody. Ovšem z grafu 3 je zřejmé, že kondenzátory vykazují pro stejné hodnoty proudu různou sílu. Opět zde platí, že čím nižší průměr malé elektrody, tím vyšší síla na daném kondenzátoru vznikne. Tuto závislost lze snadno vysvětlit tak, že zvýšená intenzita elektrického pole pro menší průměry malé elektrody

nezpůsobí pouze nárůst počtu nabitých částic, ale zvýší také silové působení, kterým jsou tyto částice ovlivňovány v elektrickém poli. To lze ukázat na upraveném vztahu (3):

$$\vec{F}_e = Q \cdot \vec{E}, \quad (8)$$

kde F_e je elektrická síla působící na částici s nábojem Q v elektrickém poli o intenzitě E . Zvýšení intenzity tedy způsobí zvýšení síly, kterou jsou nabitě částice přítomné v elektrickém poli přitahovány (nebo odpuzovány – podle polarit) ke zdrojům pole. Větší síla působící na nabitě částice následně zvětší sílu, kterou pohyb těchto částic způsobí.

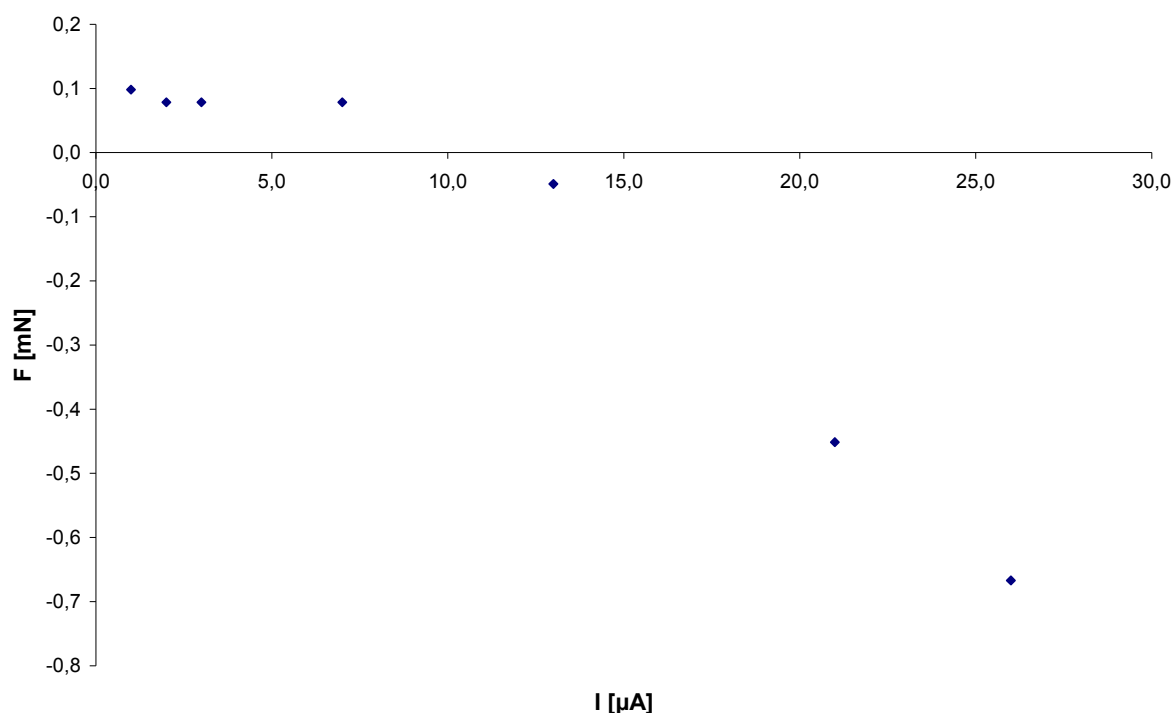
Lze tedy říci, že účinek změny průměru malé elektrody je trojí. Zmenšení průměru malé elektrody způsobí:

1. zvýšení počtu nabitých částic pohybujících se mezi elektrodami, a tedy přímo úměrně zvětší vznikající sílu.
2. zvětšení intenzity elektrického pole kolem elektrody, čímž se zvýší silový příspěvek jednotlivých nabitých částic na kondenzátor.
3. snížení hodnoty napětí potřebné pro začátek vzniku síly (lze vidět z VA charakteristiky - viz graf 2).

Existuje ovšem hodnota průměru malé elektrody, při které bude vznikající síla nulová. Pokud tuto hodnotu překročíme, vznikající síla se opět objeví, ale v opačném směru.

Situaci lze pak vysvětlit tím, že při této limitní hodnotě průměru malé elektrody se kondenzátor přestane chovat jako asymetrický. Znamená to, že intenzita elektrického pole kolem obou elektrod je v takovém případě téměř stejná a připojíme-li dostatečně vysoké napětí, aby se začal ionizovat vzduch kolem malé elektrody, dojde k ionizaci ve stejné míře i kolem elektrody velké. Síly vzniklé díky následnému pohybu iontů se navzájem odečtou.

Při překročení limitní hodnoty průměru malé elektrody se dostaneme do situace, kdy se ionizace dříve a výrazněji začne projevovat kolem velké elektrody. V tomto případě se malou elektrodou, tedy hlavním zdrojem ionizace, stane elektroda, která byla dříve velkou elektrodou. Proto také dojde k obrácení směru síly. Tento jev si můžeme ukázat na grafu 4.



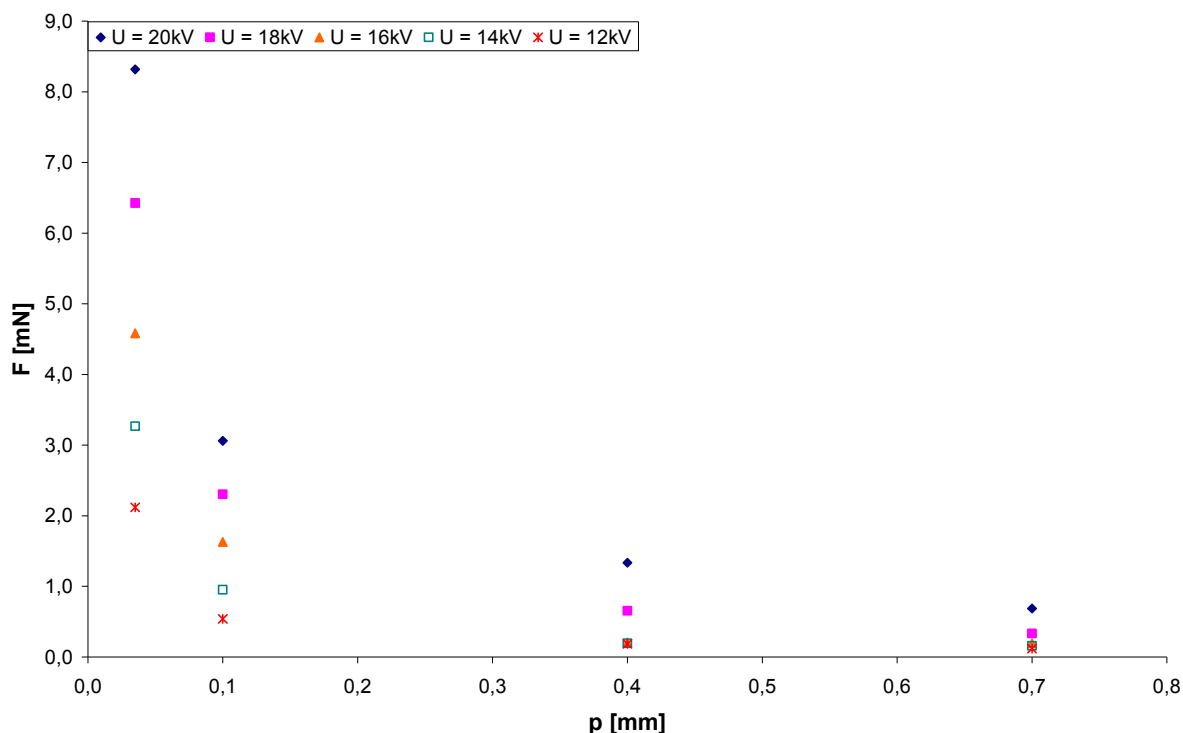
Graf 4: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro průměr drátu malé elektrody $p = 1,7 \text{ mm}$

Zmiňovaná limitní hodnota průměru malé elektrody závisí na vlastnostech povrchu a rozměrech použité velké elektrody. V našem případě byla velká elektroda kvádr s čelem (plocha nejbližší malé elektrodě) 10 mm tlustým. Ale hrany velké elektrody a případné ostré nerovnosti na jejím povrchu výrazně snižují rozměr, který musí průměr malé elektrody dosáhnout, aby se stal limitním.

Z grafu 4 je vidět, že stačil průměr malé elektrody 1,7 mm, aby došlo ke vzniku alespoň minimální síly v opačném směru. V ideálním případě s velkou elektrodou ve tvaru hladkého válce by samozřejmě malá elektroda dosáhla limitního průměru až tehdy, kdy by se její průměr přesně rovnal průměru velké elektrody. Podle průměru válcových elektrod a jejich vzdálenosti je samozřejmě možné, že dříve než dosáhne intenzita elektrického pole v okolí elektrod dostatečné hodnoty k vytvoření koronového výboje a ionizace okolního vzduchu, může dojít k překročení elektrické pevnosti vzduchu a vytvoření jiskrového výboje, tedy zkratu.

Protože ale při našem měření není velká elektroda válcová ale kvádrová s nedefinovaným poloměrem křivosti hran, je limitní hodnota průměru malé elektrody mnohokrát nižší.

Na začátku této kapitoly jsme si dali za úkol pokusit se o kvantifikaci vlivu změny rozměru na velikost síly pomocí bezrozměrného koeficientu. Při snaze učinit tak s průměrem malé elektrody narazíme na značný problém.



Graf 5: Závislost vznikající síly F na průměru malé elektrody p pro různá použitá napětí

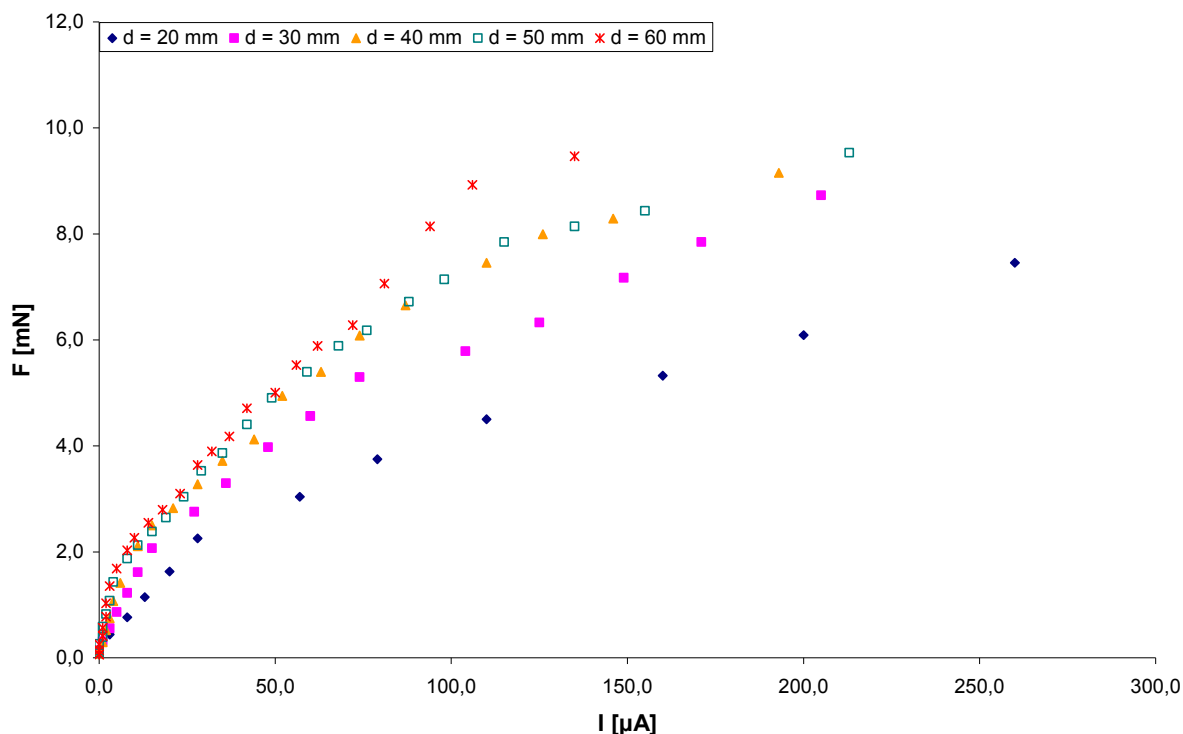
Na grafu 5 vidíme, že vztah průměru malé elektrody a vznikající síly je netriviální funkcí závislou na napětí a pravděpodobně také na proudu. Nelze jej tedy jednoduše vyjádřit jako bezrozměrnou konstantu.

4. 2. Vzdálenost elektrod

Dalším snadno měnitelným rozměrem na měřeném elementu je vzdálenost mezi malou a velkou elektrodou. Měnit ji lze pouhým posouváním drátu malé elektrody po skleněných distančních sloupcích, na kterých je volně upevněná. Aby bylo možno měnit tuto veličinu v dostatečně velkém rozsahu, bylo nutné předdimenzovat délku distančních sloupků.

Předpokladem pro toto měření bude shoda s odvozeným vzorcem (1) pro výpočet vznikající síly uvedeném v kapitole 1. 4. Musí tedy platit přímá úměrnost mezi vzdáleností

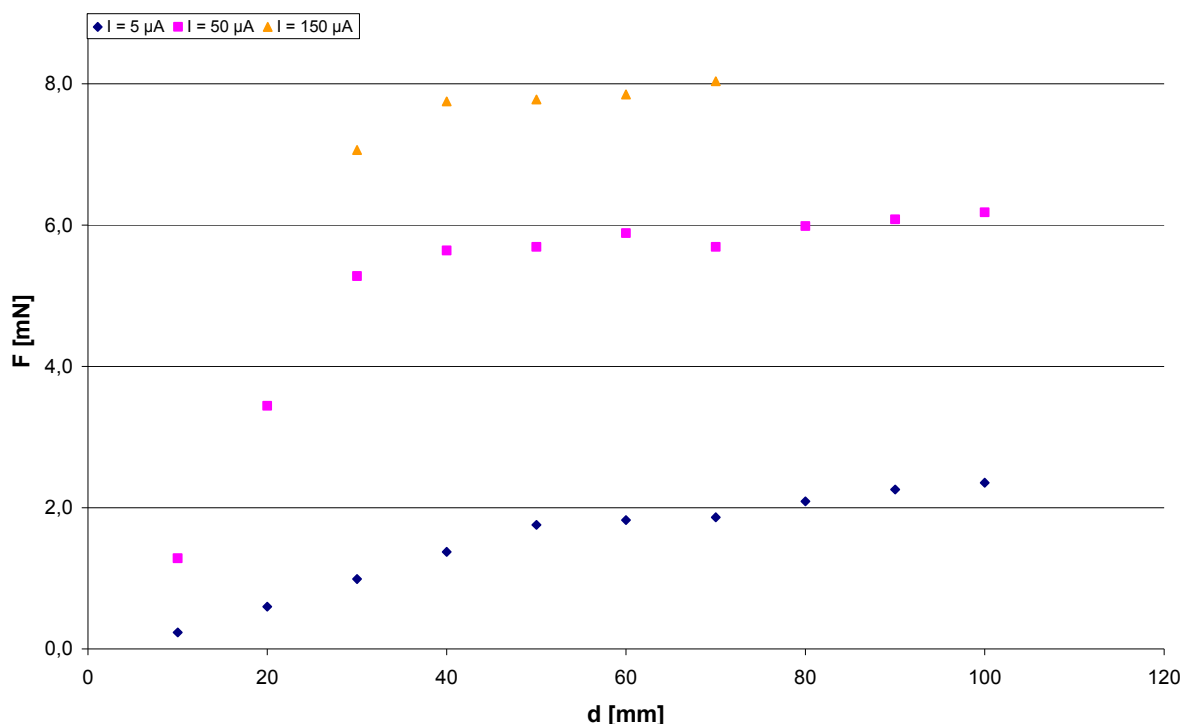
elektrod a velikostí vznikající síly. Důvodem je, že se zvětšením vzdálenosti mezi elektrodami vzroste dráha, kterou musí nabitě částice urazit, a tedy vzroste i počet srážek, které za svou dráhu vykonají. Z toho plyne zvýšení vznikající síly při stejném procházejícím proudu (množství nabitých částic pohybujících se mezi elektrodami) pro větší vzdálenost elektrod.



Graf 6: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro různé vzdálenosti elektrod

Graf 6 potvrzuje naši počáteční domněnku. Je zřejmé, že při zvětšení vzdálenosti mezi elektrodami dochází pro stejnou hodnotu procházejícího proudu I ke zvětšení hodnoty vznikající síly. To odpovídá vzorci (1) a potvrzuje teorii, ze které vycházíme.

Abychom získali přesnější obraz o tomto průběhu, bylo toto měření provedeno v modifikované podobě ještě jednou. Tentokrát nebyly zaznamenávány hodnoty měřených veličin pro jednotlivé hodnoty napětí, ale naopak bylo pro každou nastavenou vzdálenost elektrod napětí zvyšováno vždy až do dosažení několika konkrétních hodnot procházejícího proudu, pro které teprve byly zapsány hodnoty vznikající síly. Pro toto měření bylo navíc sledováno více hodnot vzdáleností elektrod, což v minulém grafu z důvodu přehlednosti nebylo možné. Po vynesení těchto nových a lépe srovnatelných hodnot do grafu můžeme o veličině d , tedy vzdálenosti elektrod, prohlásit ještě jeden zajímavý fakt.



Graf 7: Závislost vznikající síly F na vzdálenosti elektrod d pro několik hodnot procházejícího proudu

Z grafu 7 je jasné patrné, že předpokládaná přímá úměrnost mezi vzdáleností elektrod a vznikající silou je velice přesná, ale pouze do určité vzdálenosti. Při překročení hodnoty vzdálenosti elektrod cca 40 mm dochází k výraznému zpomalení až téměř zastavení růstu vznikající síly. Tento jev je způsoben několika vlivy.

Prvním vlivem jsou svodové proudy. Se zvětšující se vzdáleností malé a velké elektrody se totiž začne zvětšovat vliv okolních předmětů, které se pak stále výrazněji začínají chovat jako další uzemněná elektroda. Nabité částice, které se při nižších vzdálenostech elektrod pohybovaly pouze ve směru od malé elektrody k velké a generovaly tak mechanickou sílu v jednom směru, se při zvětšení vzdálenosti mezi elektrodami začnou pohybovat i směrem k dalším blízkým okolním objektům (např. stojan podpírající element, laboratorní stojan držící přívodní vodiče). Srážky s neutrálními částicemi vzduchu, které na své cestě absolvují, přispějí pouze minimálně ke vznikající síle. V případě polystyrénového stojanu, který je od malé elektrody v přesně opačném směru než je velká elektroda, mohou být tyto srážky dokonce od vznikající síly odečítány. Nabité částice mají sice vlivem prodloužení své dráhy větší příspěvek k síle, ale počet těch, které se stále pohybují mezi malou a velkou elektrodou, se s větší vzdáleností mezi elektrodami snižuje.

Tento jev se projevuje i přesto, že byly distanční sloupky dimenzovány tak, aby i při dosažení maximální vzdálenosti elektrod 100 mm byla velká elektroda ze všech okolních objektů k malé elektrodě nejbližší.

Druhým vlivem, který způsobuje zastavení růstu vznikající síly s rostoucí vzdáleností mezi elektrodami, je rekombinace iontů. Protože se nepohybují ve vakuu, mají ionty značně omezenou životnost a tedy i dolet. Pokud zvětšíme dráhu, kterou musí projít, může se stát, že dojde k jejich rekombinaci (neutralizaci) dříve, než dorazí k druhé elektrodě. Počet srážek (a tedy i příspěvek ke vznikající síle), které za svůj „život“ absolvují, je tedy nižší, než kdyby prošly celou vzdáleností mezi elektrodami.

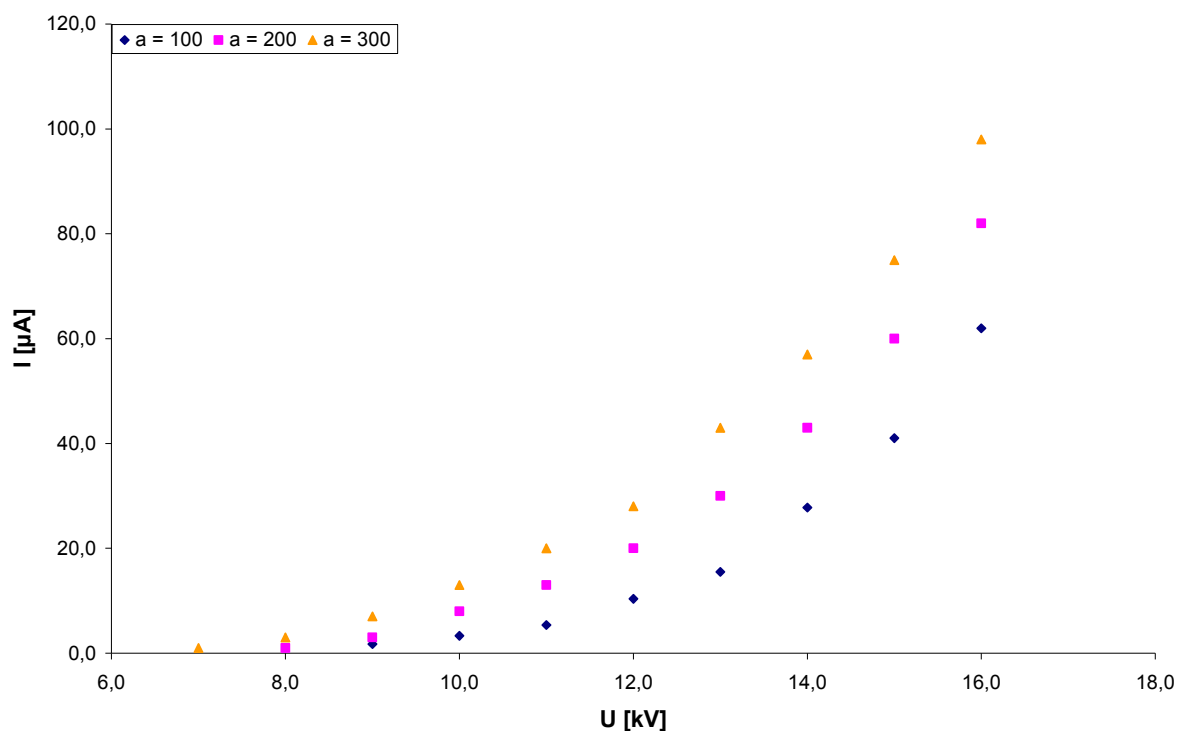
Ačkoliv nám odvozený vzorec (1) předpovídá zvýšení vznikající síly pro vyšší hodnoty vzdálenosti elektrod, není efektivní tento parametr zvyšovat nad hodnotu cca 40 mm.

4. 3. Rozměry velké elektrody

Předešlé experimenty byly z praktického hlediska snadno uskutečnitelné. Při změně vzdálenosti elektrod i při změnách parametrů malé elektrody nebylo nutné měnit hlavní část kondenzátoru – velkou elektrodu s připevněnými distančními sloupky. Abychom mohli posoudit vliv změn jednotlivých parametrů velké elektrody na generovanou sílu, bude třeba měnit právě tuto část kondenzátoru. Proto bylo vyrobeno několik sad kondenzátorů, které se od sebe liší vždy změnou jednoho rozměru velké elektrody (a – délka, b – výška, c – šířka), zatímco všechny ostatní rozměry kondenzátoru jsou zachovávány v základních hodnotách (viz tabulka 1).

4. 3. a. Délka

První rozměr velké elektrody, který budeme měnit, je její délka. Kvůli konstrukci kondenzátoru, kterou jsme zvolili, je délka velké elektrody totožná s délkou celého kondenzátoru a tedy i s délkou elektrody malé. Předpokladem pro toto měření je, že s prodloužením rozměru a se zvětší i naměřený proud procházející mezi elektrodami. Důvodem je právě prodloužení malé elektrody, která je zdrojem ionizace okolního vzduchu. Se změnou proudu předpokládáme také úměrnou změnu vznikající síly.



Graf 8: Závislost procházejícího proudu I na připojeném napětí U pro různé délkové rozměry kondenzátoru

Z grafu 8 vidíme, že náš předpoklad se shoduje s naměřenými daty. Při zvýšení hodnoty parametru a , tedy délky kondenzátoru a zároveň délky malé elektrody, vzniká více nabitých částic při stejném připojeném napětí. Pro nižší hodnoty napětí (respektive proudu) platí také čistě multiplikativní závislost mezi změnou délky a změnou procházejícího proudu:

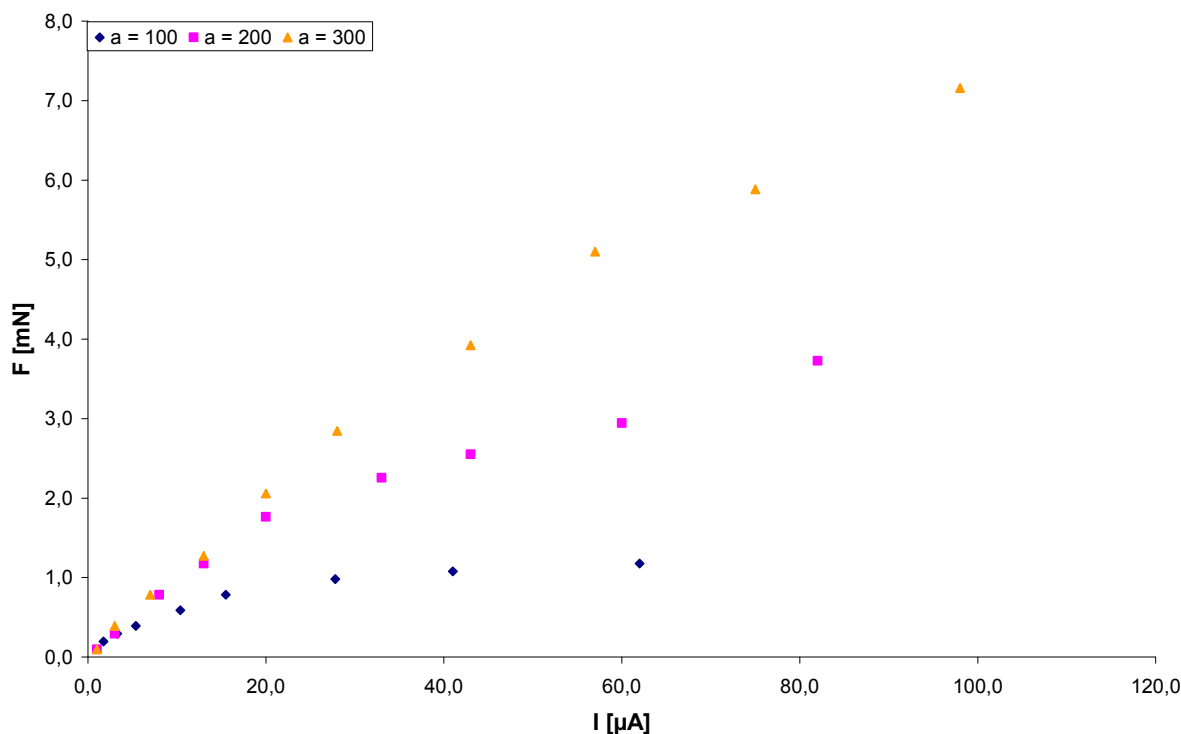
$$I_2 = \frac{a_2}{a_1} I_1, \quad (9)$$

kde I_1 a I_2 jsou procházející proudy na kondenzátorech s korespondující délkou a_1 a a_2 . Například dvojnásobné prodloužení elementu vyvolá tedy dvojnásobný proud, právě proto, že se dvojnásobně prodlouží malá elektroda a tedy i prostor, ve kterém dochází k ionizaci.

Existuje ovšem hraniční hodnota napětí (cca 13 - 15 kV) při jehož překročení přestává tento vztah platit. Důvodem je odlišný průběh děje, kterým při vyšších napětích vznikají nabitě částice kolem malé elektrody.

V článku [16] byl odvozen vzorec (1) predikující hodnotu vznikající síly v závislosti na protékajícím proudem. Tento vztah má přesnou shodu s naměřenými hodnotami do téže hraniční hodnoty napětí, potažmo proudu, jako v našem měření. Měření byla prováděna na

kondenzátoru se stejnou geometrií a délkou 100 mm. Při překročení této hraniční hodnoty dochází k výraznému odklonu hodnot naměřených a vypočtených. Důvodem uváděným v článku je právě změna průběhu ionizace (např. nástup nárazové ionizace a další jevy komplikující popis) a tedy i podmínek, pro které byl vzorec odvozen. Stejně příčiny stojí za neshodou vypočtených hodnot s naměřenými i v našem případě.



Graf 9: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro různé délkové rozměry kondenzátoru

Druhá část našich předpokladů, tedy že úměrně s proudem vzroste i síla, se dle grafu 9 nepotvrdila. Pokud bychom totiž uvažovali, že se změnou délky se tvar elektrického pole téměř nemění, muselo by platit, že pro stejné hodnoty proudu dosahuje vznikající síla také stejných hodnot bez ohledu na délku kondenzátoru. Graf 9 ovšem ukazuje, že při stejných hodnotách proudu dochází při prodloužení kondenzátoru ke vzniku podstatně větší síly.

Abychom vysvětlili, co stojí za nepotvrzením předpokladu, musíme si zavést novou veličinu – hustotu iontů vznikajících na jednotce délky $\rho_i(E)$ – jako funkci intenzity elektrického pole. Abychom na elementu získali vyšší generovanou sílu, máme dvě možnosti:

- 1) Zvýšením připojeného napětí U zvýšíme intenzitu elektrického pole. To následně způsobí zvýšení naší nové veličiny ρ_i , protože se zvýšením E se zvýší míra ionizace,

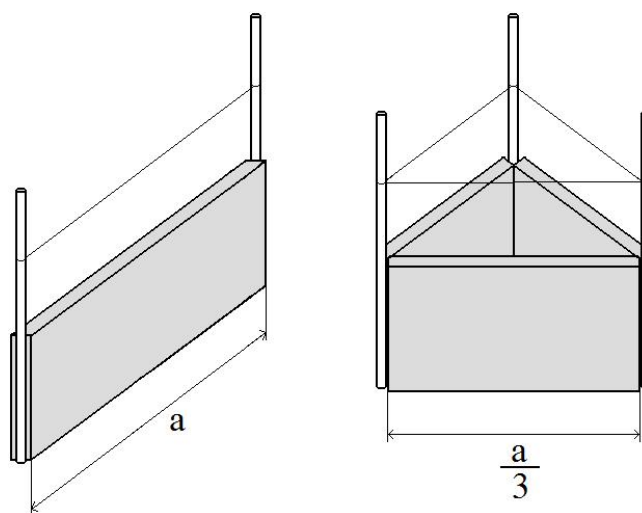
tedy i počet vznikajících nabitých částic. Větší počet nabitých částic srážkami s částicemi okolního média produkuje ve výsledku více příspěvků k vznikající síle.

- 2) Druhou možností je při zachování stejné hodnoty napětí U , prodloužit zdroj ionizace (malou elektrodu). Intenzita elektrického pole E a tedy i hustota iontů vznikajících na jednotce délky ρ_i zůstanou stejné. Ovšem celkový počet nabitých částic, které vznikají kolem malé elektrody, vzroste. Vzroste tedy i síla. Pro generování stejného proudu při prodloužení kondenzátoru potřebujeme tedy nižší napětí.

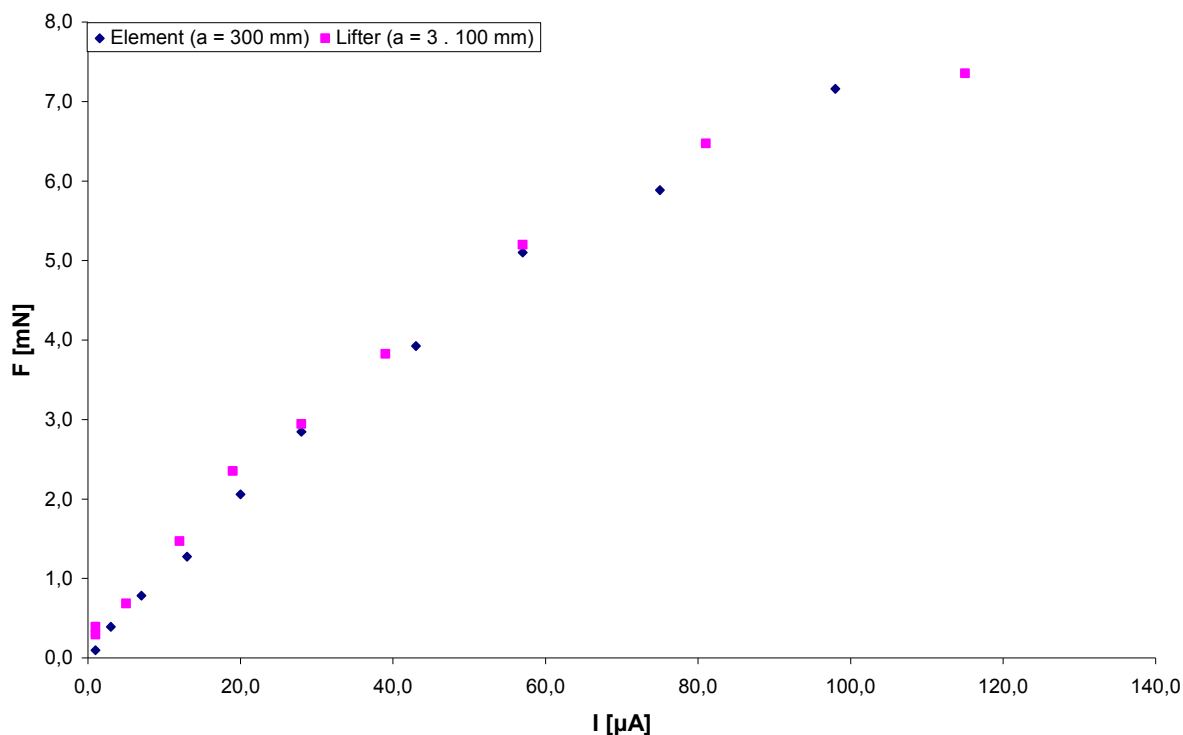
Víme [16], že od určité intenzity elektrického pole, respektive připojeného napětí, dochází v naměřených hodnotách ke zlomu od původního hladkého lineárního průběhu predikovaného vzorcem (1). Prodloužením kondenzátoru si tedy zajistíme, že i při vyšších hodnotách protékajícího proudu se budeme pohybovat v lineární oblasti průběhu před zlomem. Tento fakt je také dobře vidět na grafu 9. Kondenzátor o větší délce vykazuje delší lineární průběh růstu síly v závislosti na zvyšujícím se proudu.

S tím souvisí otázka jiných geometrií elementu. Vrátime-li se k designu lifter popisovaném v 1. kapitole, můžeme porovnat efektivitu tohoto často používaného designu s naším elementem.

Pro účely experimentu byl vyroben lifter tak, aby jeho rozměry přesně odpovídaly rozměrům již měřeného elementu. Jeho díly byly uspořádány do nejjednoduššího tvaru rovnostranného trojúhelníku se stranou 100 mm. Naměřené hodnoty vznikající síly byly následně porovnány s hodnotami naměřenými na elementu s aktivní délkou 300 mm.



Obr. 23: Schéma kondenzátorů s geometrií lifter a element se shodnou aktivní délkou



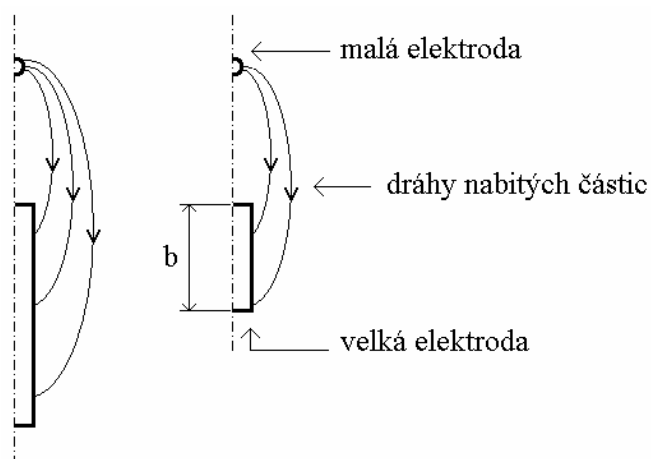
Graf 10: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro geometrii element a lifter

Na grafu 10 je možné vidět, že hodnoty vznikající síly naměřené na elementu a na lifteru jsou téměř identické. Toto měření odpovídá na otázku, zda se design spojených elementů tvořících rovnostranný n -úhelník (lifter) liší svou efektivitou od prostého stejně dlouhého elementu. Tato otázka byla vznesena především kvůli proudění, které bylo kolem designu lifter pozorováno – proud vzduchu koncentrovaný uprostřed lifteru.

Na grafu 10 je ovšem jasně vidět, že se lifter účinností neliší od prostého elementu a jediným přínosem jeho designu uzavřeného n -úhelníku je stabilita na podložce.

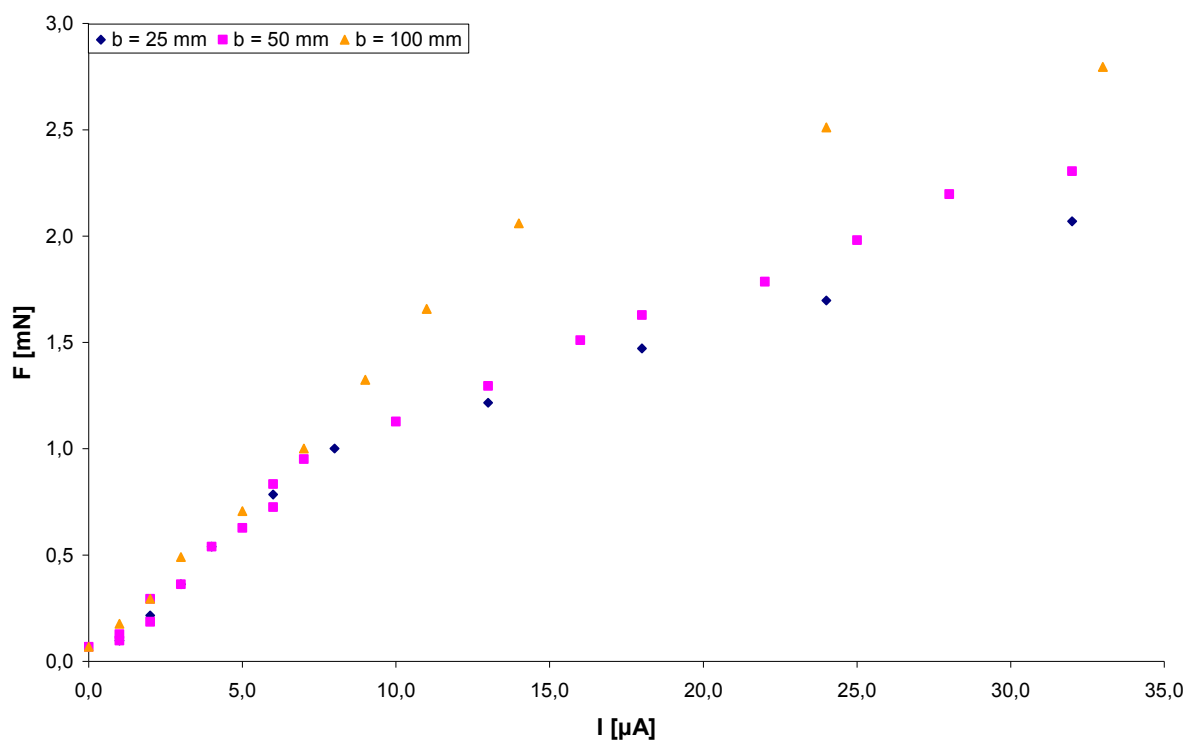
4. 3. b. Výška velké elektrody

Dalším rozměrem, který by mohl mít vliv na vznikající sílu, je výška velké elektrody – parametr b . Předpokládaným výsledkem měření je zvýšení vznikající síly při zvětšení výšky velké elektrody. Při zvětšení tohoto rozměru se totiž prodlužuje část drah, po kterých se pohybují nabitě částice od jedné elektrody k druhé (viz obr. 24). Nabitě částice tak na delší dráze absolvují více srážek.



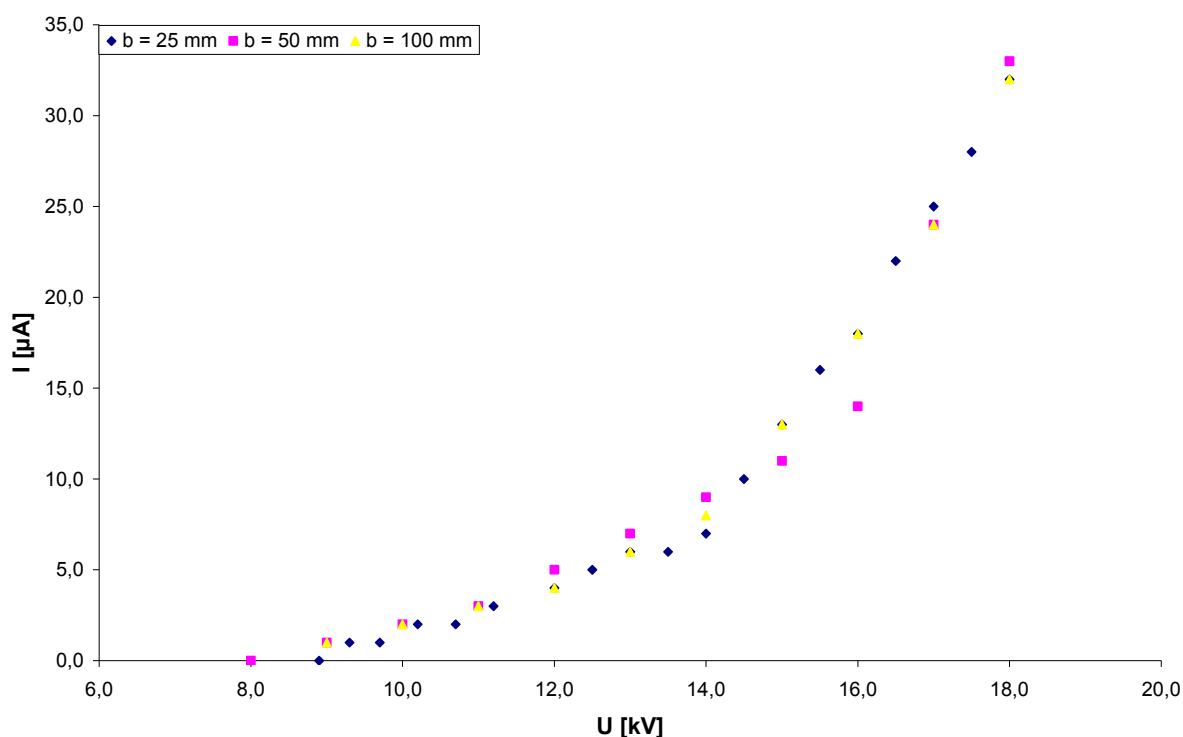
Obr. 24: Schematické znázornění změny délky drah, po kterých cestují nabitě částice od jedné elektrody k druhé, při změně výšky velké elektrody b

Pro ověření tohoto předpokladu bylo provedeno měření na elementech s výškou elektrod 25 mm, 50 mm (základní rozměr) a 100 mm. Na grafu 11 je patrné, že se náš předpoklad potvrdil. Při stejném proudu je vznikající síla opravdu vyšší pro element s větším rozměrem b . Stejný počet nabitých částic tedy poskytuje větší příspěvek ke vznikající síle.



Graf 11: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro elementy s různou výškou velké elektrody b

Dalším zajímavým faktem je, že rozdíl mezi naměřenými hodnotami pro rozměry velké elektrody b 25 mm a 50 mm je výrazně menší než rozdíl pro rozměry 50 mm a 100 mm. Vysvětlením je, že zvětšení výšky velké elektrody nemá na celkové trajektorie iontů multiplikativní efekt ale pouze aditivní. Zvětšení b tak prodlouží trajektorii části iontů (cestujících po obvodu kondenzátoru nikoliv přímo mezi elektrodami) pouze o danou hodnotu. A protože je rozdíl mezi prvními dvěma hodnotami b pouze 25 mm je rozdíl na nich naměřených hodnot síly výrazně nižší, než rozdíl hodnot naměřených pro elementy s rozdílem výšek 50 mm. Dalším potvrzením této hypotézy je voltampérová charakteristika na grafu 12.



Graf 12: Závislost procházejícího proudu I na připojeném napětí U pro elementy s různou výškou velké elektrody b

V grafu 12 lze zřetelně vidět, že změnou výšky velké elektrody nedojde ke změně hodnot proudu protékajícího kondenzátorem. Změna naměřených hodnot generované síly tedy není způsobena zvýšením / snížením počtu nabitých částic. Jedná se tedy opravdu pouze o změnu délky dráhy, kterou urazí, a tedy i počtu srážek, které na této dráze absolvují.

Nelze si ovšem nepovšimnout, že rozdíly naměřených hodnot vznikající síly jsou stále velmi nízké (viz graf 11). Při dvojnásobném zvětšení parametru b z 50 mm (základní rozměr) na 100 mm bylo využito stejné množství materiálu (respektive přidané hmotnosti) jako na zvětšení délky kondenzátoru a ze 100 mm (základní rozměr) na 200 mm v minulé kapitole

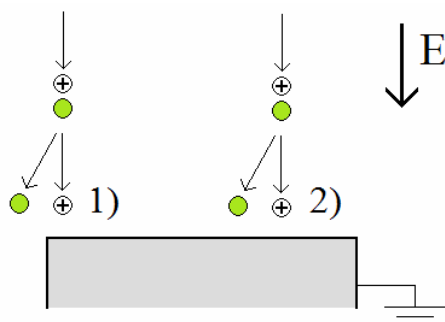
(graf 9). Přesto je rozdíl vznikající síly pro změnu délky a více než dvojnásobný než při změně výšky velké elektrody b .

4. 3. c. Šířka velké elektrody

Posledním rozměrem, měřeným na elementu, je šířka velké elektrody. Z rešerše i z vlastních měření víme, že zároveň s generovanou silou vzniká kolem kondenzátoru proudění vzduchu. Toto proudění je přímo způsobené interakcemi nabitých a neutrálních částic, které stojí právě za vznikem síly, a může mít výrazný vliv na fungování asymetrického kondenzátoru při změně šířky jeho velké elektrody.

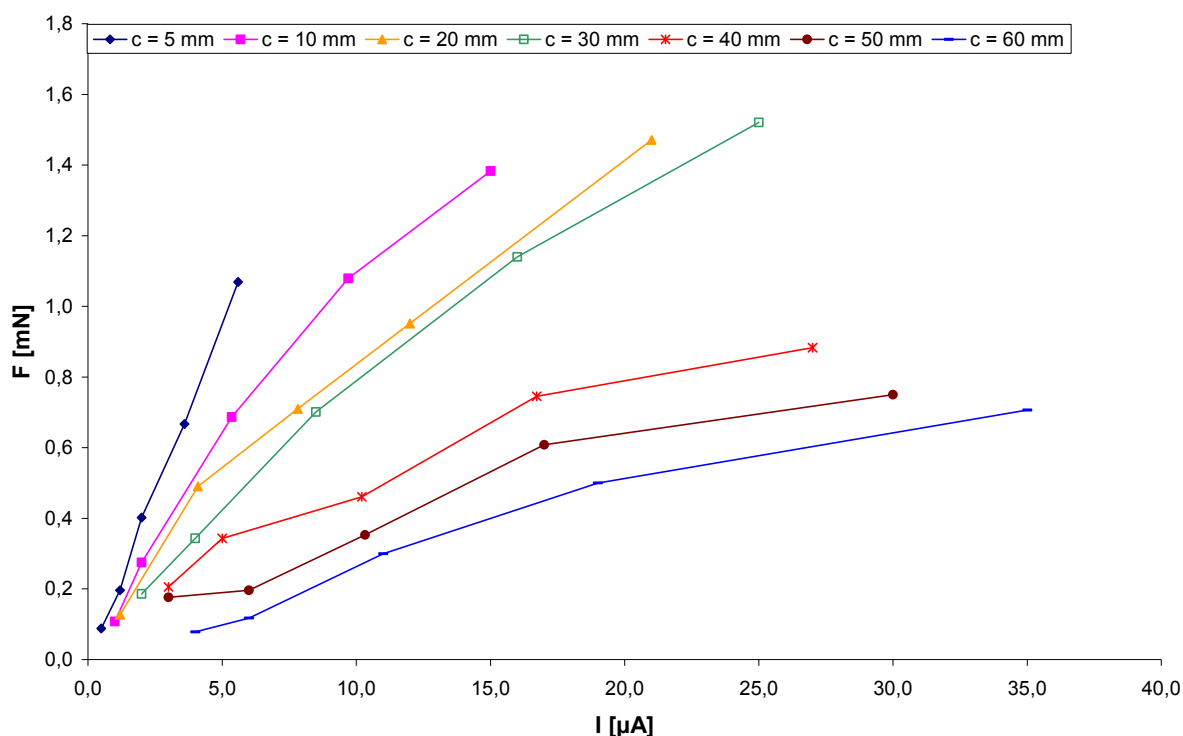
V následujícím experimentu je opět měřena vznikající síla na elementech s odlišnou hodnotou c , tedy šířkou velké elektrody. Předpokladem je, že pro vyšší hodnoty c bude hodnota naměřené síly nižší. Víme, že měřená síla je způsobena složením součtu hybnosti získanou srážkami nabitých částic s neutrálními částicemi okolního vzduchu. Nelze ovšem zapomínat, že stejnou hybnost, která je po srážce díky elektrickému poli přenesena z nabitých částic na kondenzátor, odnášejí po srážkách i neutrální částice vzduchu. Pokud se tato hybnost ztratí srážkami s jinými neutrálními částicemi vzduchu, popřípadě s okolními objekty, všechny příspěvky hybnosti přenesené na kondenzátor opravdu přispívají ke vznikající síle (viz obr. 25-1).

Druhou možností ale je, že neutrální částice vzduchu nesoucí hybnost ze srážky s nabitou částicí narazí na kondenzátor a svou hybnost mu tak předá (viz obr. 25-2). Část síly, která vznikla díky srážce nabité částice s touto neutrální částicí vzduchu, se tak odečte. Výsledná generovaná síla je tedy o tolik menší, kolik neutrálních částic vrátí svou hybnost zpět kondenzátoru.



Obr. 25: Schematické znázornění dvou variant pohybu nabitých a neutrálních částic v okolí uzemněné velké elektrody – neutrální částice po srážce 1) odletí mimo kondenzátor, 2) narazí do kondenzátoru a předá mu zpět svou hybnost nabytou předchozí srážkou

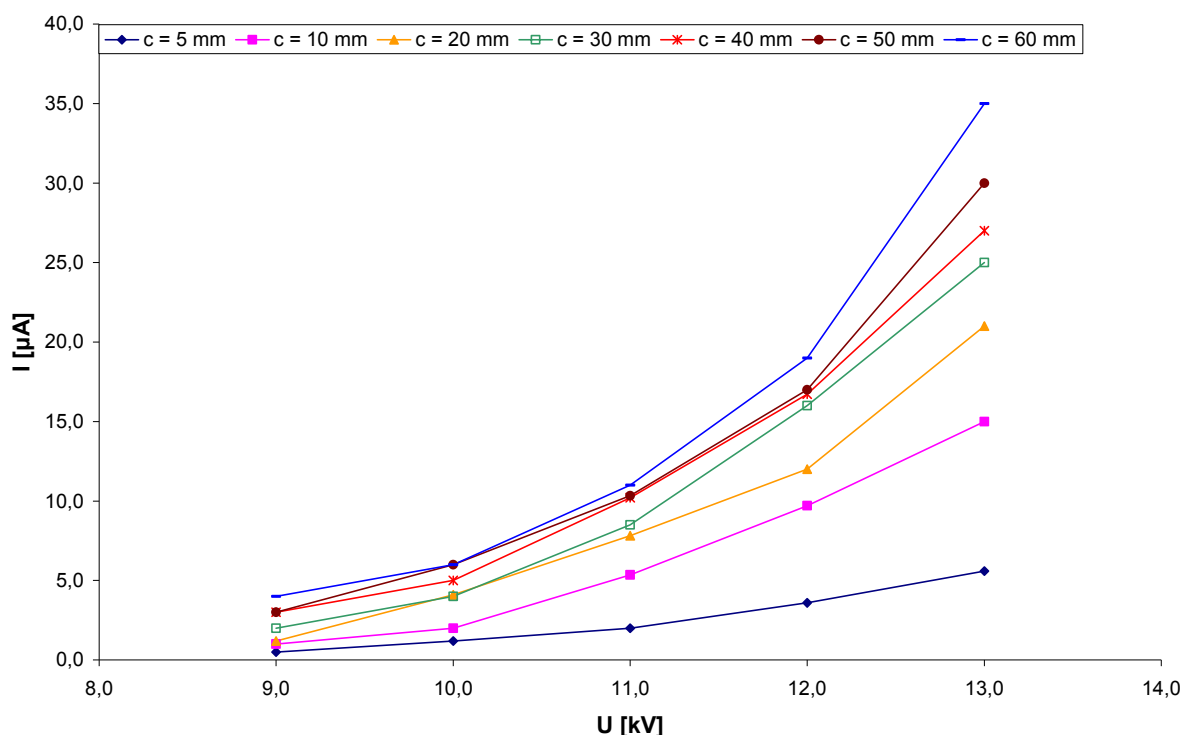
Po dokončení měření byly hodnoty vloženy do grafu 13. Z důvodu zvýšení přehlednosti při velkém počtu naměřených hodnot byly body jednotlivých řad spojeny stejně barevnými úsečkami.



Graf 13: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro elementy s různou šířkou velké elektrody při použitím napětí 9 kV – 13 kV

Z grafu 13 je možné učinit dva důležité závěry. První je potvrzení našeho předpokladu. Elementy s širší velkou elektrodou opravdu generují nižší sílu při stejném protékajícím proudu.

Druhým poznatkem je skutečnost, že při stejných hodnotách připojeného napětí prochází mezi elektrodami elementů s vyšší hodnotou c vyšší elektrický proud. Tento fakt lze pozorovat lépe, podíváme-li se na jejich voltampérovou charakteristiku (viz graf 14). Spojení bodových vyjádření naměřených hodnot zde bylo opět provedeno pouze z důvodu lepší přehlednosti.



Graf 14: Závislost procházejícího proudu I na připojeném napětí U pro elementy s různou šířkou velké elektrody

Lze tedy říci, že pokud by nedocházelo k dodatečným ztrátám síly vlivem srážek neutrálních molekul s širokou velkou elektrodou, elementy s větším parametrem c by měly vykazovat výrazné zvýšení generované síly právě díky tomu, že jimi prochází výrazně vyšší elektrický proud (viz graf 14).

5. Vliv aerodynamického odporu

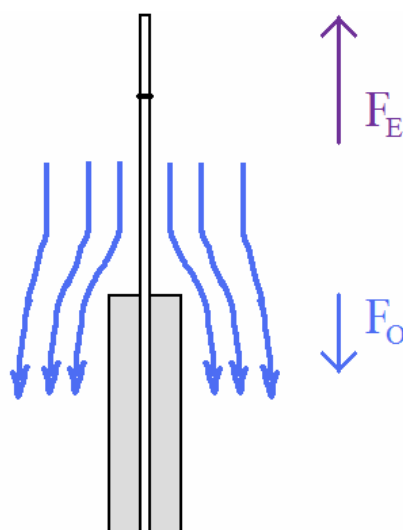
V této kapitole se budeme zabývat tématem nastíněným v kapitole minulé. Bude zde diskutováno, jak je vznikající síla ovlivněna prouděním vzduchu, které se kolem kondenzátoru s asymetrickými elektrodami objevuje a je vyvolané stejným principem, který dává vzniknout pozorované síle.

5. 1. Rychlost generovaného proudění vzduchu

Proudění vzduchu vznikající na kondenzátoru bylo diskutováno již v několika kapitolách, ovšem vždy pouze jen jako jev, který je třeba mít na paměti při měření vznikající síly. Zde se pokusíme o alespoň základní kvantitativní popis tohoto proudění.

Víme, že zkoumaný fenomén funguje tak, že při pohybu nabitých částic pohybujících se vzduchem mezi elektrodami dochází k jejich kolizi s neutrálními částicemi vzduchu. Hybnost, kterou získají z těchto srážek, předají nabitě částice přes elektrické pole na konstrukci kondenzátoru (tím dojde ke vzniku generované síly F_E). Ale srážky dají vzniknout také proudu částic vzduchu ve směru opačném k F_E . Ten by v ideálním případě pokračoval pryč od kondenzátoru bez jakéhokoliv odporu.

Protože ale nepracujeme v ideálních podmínkách, určitá část hybnosti, která je nesená proudem neutrálních částic vzduchu, je přenesena zpět na kondenzátor (nárazem na velkou elektrodu). Tím vznikne odporová síla F_O působící na kondenzátor v opačném směru než F_E (viz obr. 26).



Obr. 26: Schematicky znázorněné proudění okolního vzduchu kolem kondenzátoru včetně generované síly F_E a odporové síly F_O vyvolané obtékáním velké elektrody

To lze vyjádřit jednoduchým vztahem:

$$F = F_E - F_O, \quad (10)$$

kde F je síla naměřená, F_E je síla generovaná předanými hybnostmi nabitých částic, F_O je síla odporová a reprezentuje působení proudu neutrálních částic vzduchu narážejících zpět do kondenzátoru.

Tento vztah nám mimo jiné ukazuje, že síla F , kterou naměříme, je snižována o hodnotu odporové síly F_O , což byl také jeden ze závěrů minulé kapitoly. Sílu F_O lze navíc využít k výpočtu rychlosti neutrálního proudu vzduchu v . Získání vztahu pro výpočet rychlosti

proudění následně otevře možnost využít kondenzátor právě za účelem generování proudění okolního média.

Nejprve vyjádříme síly v rovnici (10). Generovanou sílu lze definovat pomocí již několikrát citovaného vztahu:

$$F_E = \frac{I \cdot d}{k}, \quad (11)$$

kde I je proud procházející kondenzátorem, d je vzdálenost mezi elektrodami a k je konstanta pohyblivosti iontů, které svým pohybem mezi elektrodami způsobí vznik síly.

Na vyjádření F_O můžeme využít rovnici pro vyjádření aerodynamického odporu:

$$F_O = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2, \quad (12)$$

kde ρ je hustota vzduchu, S je obsah kolmého průřezu obtékané velké elektrody, v je rychlost vzduchu narážející na velkou elektrodu a C_x je bezrozměrný tvarový koeficient odporu velké elektrody.

Pokud dosadíme (11) a (12) do (10), dostaneme následující rovnici:

$$F = F_E - F_O = \frac{I \cdot d}{k} - \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2. \quad (12)$$

Po krátké úpravě získáme vztah:

$$v = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{I \cdot d}{k} - F \right)}{C_x \cdot \rho \cdot S}}. \quad (13)$$

V této rovnici známe všechny parametry kromě rychlosti v , kterou se snažíme spočítat. Za proud I a sílu F lze dosadit korespondující naměřené hodnoty. Pro napětí $U = 15$ kV byl naměřen proud $I = 25 \mu\text{A}$ a síla $F = 3,4$ mN.

Protože je malá elektroda jako zdroj nabitých částic připojena na kladné vysoké napětí, ionty pohybující se mezi elektrodami jsou také kladné a lze tedy použít konstantu pohyblivosti kladných iontů ve vzduchu $k = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

Protože se pohybujeme v atmosférickém tlaku, za hustotu vzduchu lze dosadit $\rho = 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Veličiny charakterizující velkou elektrodu jsou také snadno definovatelné. Protože má velká elektroda tvar kvádru, může se za tvarový koeficient dosadit $C_X = 1$. Rozměry velké elektrody nám dále určí její kolmý průřez:

$$S = a \cdot c. \quad (14)$$

Při základních rozměrech je $a = 10$ cm a $c = 1$ cm, kolmá plocha elektrody je tedy $S = 10^{-3} \text{ m}^2$.

Po dosazení hodnot získáme již konkrétní hodnotu rychlosti neutrálního proudu vzduchu narážejícího do velké elektrody:

$$v = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{25 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-4}} - 3,4 \cdot 10^{-3} \right)}{1,129 \cdot 10^{-3}}} = 0,7366 \text{ m.s}^{-1}. \quad (15)$$

Jednoduchý vzorec, kterým jsme se k hodnotě rychlosti dopočítali, má ovšem svá omezení. Podmínkou pro jeho správnost je zachování předpokladů nutných pro vznik síly. Tedy například snižováním hustoty vzduchu (při snížení tlaku) by teoreticky mělo vést k výraznému nárůstu rychlosti proudění. Změna hustoty vzduchu ale ovlivní mnoho dalších parametrů, např. pohyblivost iontů k , která je závislá mimo jiné na tlaku média, popřípadě naměřené hodnoty síly a proudu. Při výraznějších změnách tlaku také může dojít k úplnému zániku koronového výboje a tedy i zániku generované síly.

Stejně tak změna průřezu velké elektrody S vyvolá změnu v naměřených hodnotách síly i proudu (viz kapitola 4. 3. c.).

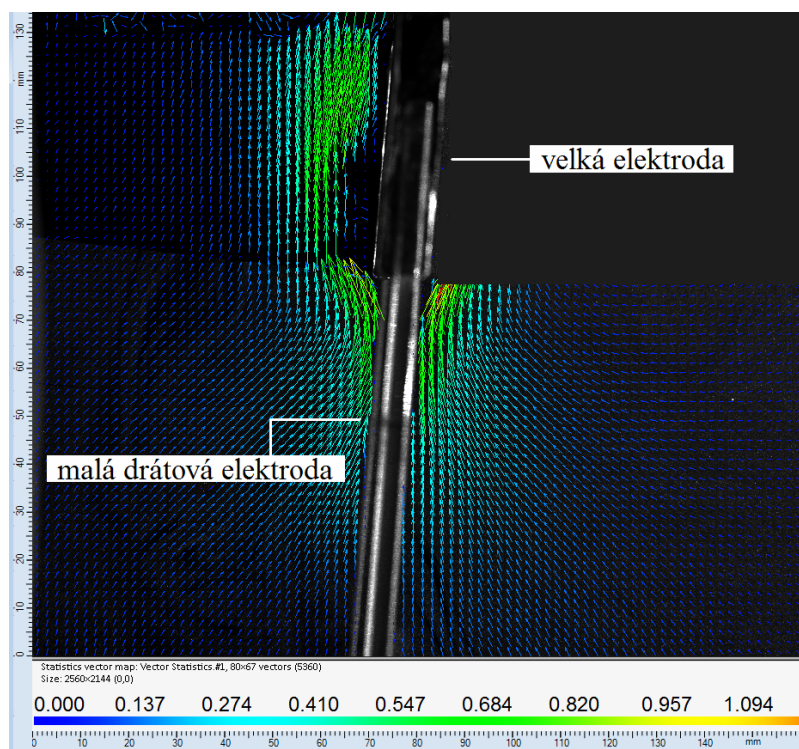
Výpočet hodnoty rychlosti je pouze teoretický. Abychom mohli tento vztah dále používat, je nutné ho podpořit měřením.

Měření rychlosti v použitém experimentálním uspořádání s sebou přináší dva hlavní problémy. Přítomnost vysokého napětí na elektrodách vylučuje použití jakékoliv kontaktní měřicích metody, popřípadě jiných metod, při kterých je třeba umístit senzor do blízkosti elektrod.

Druhým problémem je nízká předpokládaná rychlost proudu vzduchu ($< 1 \text{ m.s}^{-1}$), což znemožňuje využít některou z odolnějších ale o to méně citlivých měřicích přístrojů.

Po zvážení těchto dvou omezujících faktorů byla na měření rychlosti použita bezkontaktní měřicí metoda PIV (Particle Image Velocimetry). Byla vizualizována plocha kolmá na kondenzátor ve středu jeho délky při napětí $U = 15$ kV (viz obr. 27), aby bylo

možné porovnávat vypočtenou hodnotu rychlosti s naměřenou. Jako trasovací částice byly použity kapky olivového oleje.



Obr. 27: Vektorové pole získané pomocí vizualizační metody PIV charakterizující proudění vzduchu v okolí kondenzátoru pro připojené napětí 15 kV

Z rychlostního pole na obr 28. získaného metodou PIV je vidět, že hodnoty rychlosti (rozlišené barevnou škálou) u čela velké elektrody se pohybují v rozsahu cca $0,7 - 0,8 \text{ m.s}^{-1}$. Naměřená rychlost tedy relativně přesně odpovídá vypočtené hodnotě $v = 0,7366 \text{ m.s}^{-1}$. Tyto závěry byly publikovány v odborném časopise [21].

Na obr. 27 je také vidět, že proudění generované probíhající jevem na asymetrickém kondenzátoru je laminární. Není tedy problém s využitím jednoduchého vztahu (12) pro definici odporové síly.

5. 2. Minimalizace odporu prostředí

Z odvozeného vztahu i z následného měření v předešlé kapitole vyplývá, že hlavním faktorem snižujícím efektivitu zkoumaného jevu z hlediska aerodynamického odporu je kolmý průřez velké elektrody. Čím větší bude její plocha S a čím méně aerodynamický bude

její tvar charakterizovaný tvarovým koeficientem C_x , tím větší bude odporová síla snižující sílu, kterou se snažíme na kondenzátoru generovat.

Pokud se zaměříme pouze na tento fakt, dalším logickým krokem by bylo zaměřit se na velkou elektrodu s ideálním aerodynamickým tvarem (kapkovitý profil / profil křídla) navíc s minimálním kolmým průřezem. Nelze ale zapomenout na splnění několika důležitých podmínek vyplývajících z dosavadních závěrů této práce:

- *Generovaná síla musí vznikat pouze v jednom směru.* Při snižování kolmého průřezu S nesmí žádný z rozměrů velké elektrody klesnout pod hodnotu srovnatelnou s průměrem malé elektrody. To se týká také vytvoření jakýchkoliv nerovností nebo hrotů na povrchu velké elektrody. V takovém případě by (stejně jako kolem malé elektrody) začala probíhat ionizace také kolem velké elektrody. Vznikající síly generované oběma proudy nabitých částic by se odčítaly.
- *Vzdálenost elektrod musí být po celé jejich délce stejná.* Při použití tvarů velké elektrody s nerovným povrchem (koule, kapka) je nutné dodržet konstantní vzdálenost elektrod. Důvodem je nižší generovaná síla pro nižší vzdálenost, ale hlavně snížení přeskokového napětí v bodě nejmenší vzdálenosti. Pracovní oblast kondenzátoru je tak omezena.
- *Snahou je nalézt tvar s maximální možnou hodnotou procházejícího proudu.* Vznikající síla je přímo generována procházejícím proudem. Rozměry velké elektrody, jejichž změnou lze dosáhnout zvýšení elektrického proudu, jsou délka a (viz graf 8) a šířka c (viz graf 14). V obou případech je pro zvýšení procházejícího proudu nutné rozměr elektrody zvětšit.

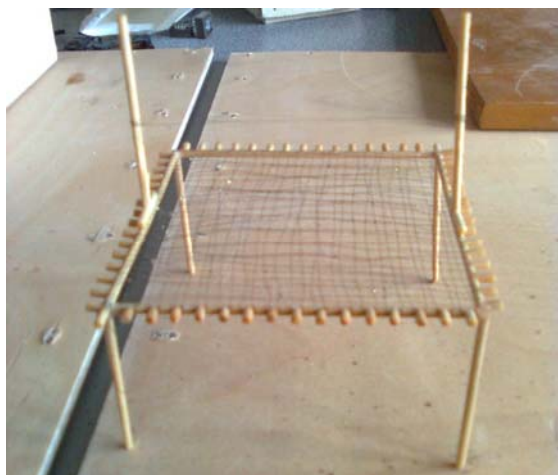
Z tohoto výčtu a hlavně ze třetího bodu vidíme, že zde dochází ke konfliktu s původní premisou. Pokud totiž ve snaze snížit aerodynamický odpor velké elektrody snížíme její kolmý průřez, snížíme tak buď její délku (a), nebo její šířku (c), popřípadě oba parametry zároveň. To způsobí snížení procházejícího proudu a následné snížení generované síly.

Aby bylo možné zachovat (nebo dokonce zvětšit) rozměry velké elektrody tak, aby vzrostl procházející proud, je nutné změnit základní vlastnosti velké elektrody:

1. Proudů vzduchu, který je generovaný pohybem nabitých částic, musí být umožněno procházet velkou elektrodou s minimálním odporem i v případě, že její rozměry neumožňují snadné obtékání.

2. Velká elektroda musí stále fungovat jako celistvá plocha z hlediska elektrických vlastností. Pokud by totiž bylo elektrické pole mezi elektrodami výrazně ovlivněné změnami struktury velké elektrody, mohlo by opět dojít ke snížení hodnoty procházejícího proudu a tedy i generované síly.

Zmíněné podmínky jsou splnitelné pouze v případě velké elektrody ve formě vodivé sítě. Tento návrh je známý již od 60-tých let 20. století, kdy s podobným designem přišel A. de Seversky [10]. Od té doby se ovšem kondenzátorem s velkou elektrodou tvořenou vodivou sítí nikdo nezabýval. Přesto se ukazuje, že tento design je řešením problému aerodynamického odporu.



Obr. 28: Fotografie prvního designu kondenzátoru s velkou elektrodou ve formě vodivé sítě s původně dřevěnou nosnou konstrukcí a s dřevěnými distančními sloupky

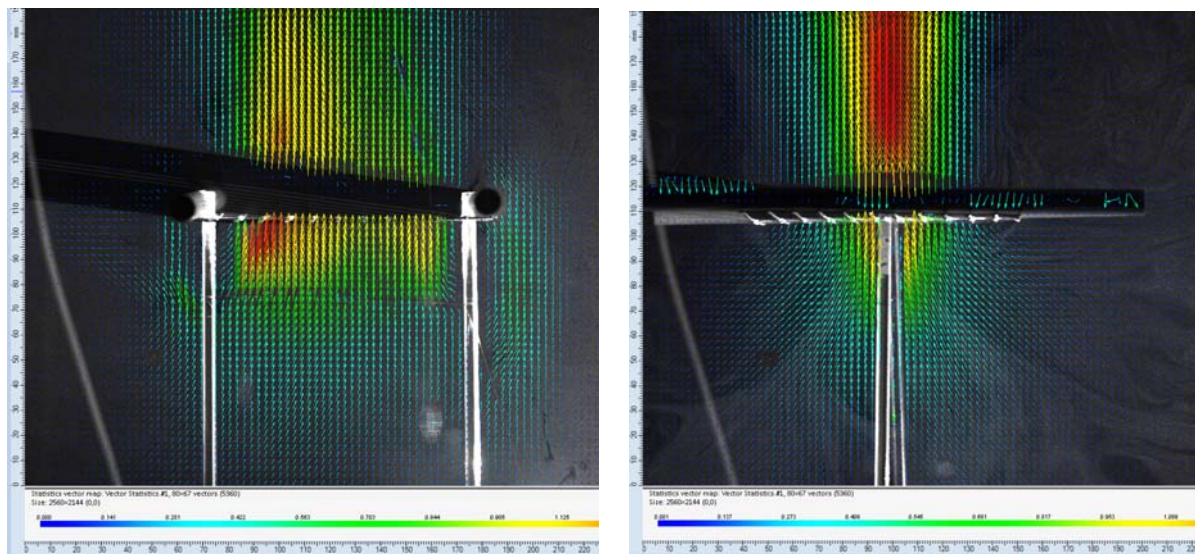
Splnění první podmínky, tedy nízký aerodynamický odpor kladený proudem vzduchu procházejícímu elektrodou, je v případě sítě snadné. Při malé rychlosti proudění pozorované na elementu (cca $0,7 - 0,8 \text{ m.s}^{-1}$) by vodivá síť s roztečí vodičů v řádu alespoň milimetrů a s průměrem vodičů do 1 mm neměla poskytovat proud vzduchu téměř žádný odpor.

Prvním jednoduchým důkazem tohoto faktu byl experiment, při kterém byl kondenzátor z obr. 28 položen na bok tak, aby směr malá elektroda – velká elektroda byl vodorovný. Za velkou elektrodu (do vzdálenosti cca 10 cm) byla umístěna zapálená svíčka. Při zvyšování napětí přivedeného na malou elektrodu se plamen svíčky začal od přípravku odklánět, až ji nakonec proud vzduchu uhasil.

Tento pokus potvrdil, že přípravek (i přes svou primitivní konstrukci) skutečně produkuje proud neutrálního vzduchu a to v předpokládaném směru – síťka tedy opravdu funguje jako velká elektroda.

Existence proudění za sítkou dostatečně silného na zhasnutí svíčky také ukazuje na nízký odpor kladený proudem neutrálních částic procházejícímu elektrodou.

Exaktnější důkaz lze vidět na obr. 29. Jedná se opět o vizualizaci proudění kolem novějšího designu kondenzátoru se sítovou velkou elektrodou (průměr vodičů 1 mm, rozteč vodičů 1 cm). Konstrukce tohoto přípravku již nebyla celá ze dřeva. Dřevěné tyčky byly použity pouze k vyrovnání sítky a k fixování jejího tvaru. Distanční sloupky však již byly skleněné, aby byl omezen vliv svodových proudů.



Obr. 29: Vektorové pole (pohled zepředu a z boku) získané pomocí vizualizační metody PIV charakterizující proudění vzduchu v okolí asymetrického kondenzátoru se sítovou velkou elektrodou o rozměru 10 x 10 cm

Z obrázku je jasně patrné, že rychlost proudění pod a nad sítkou je téměř stejná. Stejně tak tvar proudu vzduchu není po průchodu velkou elektrodou nijak deformovaný. Dosáhli jsme tedy toho, že vodivá a uzemněná síťka se pro nabitě částice pohybující se od malé elektrody jeví stále jako opačně nabitá elektroda, ke které jsou přitahovány. Naopak pro neutrální částice vzduchu, které jsou strhávány proudem nabitých částic ve stejném směru, je snadno průchozí.

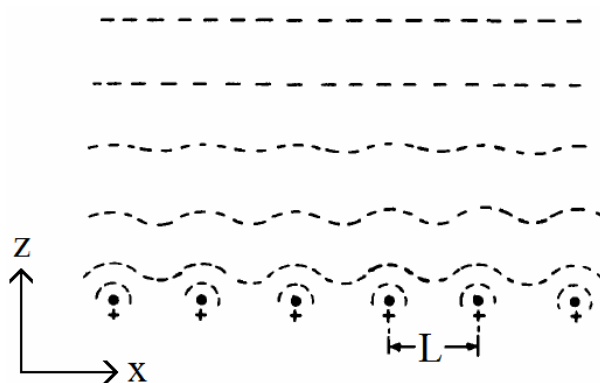
6. Sít'ová elektroda

Z měření uvedených v předchozích kapitolách je patrné, že vodivá plocha by měla fungovat jako nejefektivnější forma velké elektrody. Aby ale síla mohla být generována, je třeba minimalizovat aerodynamický odpor velké elektrody, zatímco její elektrické vlastnosti (fyzické rozměry umožňující maximální procházející proud) zůstanou nezměněny. Řešením je vodivá síť. V minulé kapitole byly definovány dvě podmínky, při jejichž splnění je možné použít síť vodičů místo původní kvádrové velké elektrody. V první části této kapitoly bude diskutována druhá z podmínek, tedy zda je možné připravit vodivou síť tak, aby se pro malou elektrodu chovala jako souvislá plocha.

V následující části kapitoly budou popsány další vlastnosti vodivé sítě a možnosti, které poskytuje její použití v roli velké elektrody.

6. 1. Elektrické pole kolem vodivé sítě

Pro jednoduchost uvažujme síť tvořenou nabitými vzájemně paralelními vodiči rozmístěnými s konstantními rozestupy. V literatuře [22] se uvádí, že pokud pozorujeme elektrické pole z dostatečné vzdálenosti nad sítí vodičů, bude se jevit jako uniformní. Bude tak vypadat stejně, jako kdyby byly náboje přítomné na jednotlivých vodičích rozloženy rovnoměrně na vodivé ploše. Pokud se budeme k vodičům přibližovat, pole přestane mít uniformní charakter. Z obr. 30 je zřejmé, že čím blíže k síťce bude elektrické pole pozorováno, tím větší bude rozdíl od původních uniformních hodnot. Je také vidět, že fluktuace mají periodický charakter.



Obr. 30: Nákres ekvipotenciálních ploch nad sítí nabitých vodičů – upraveno z [22]

Feynman v [22] dále uvádí, že složka Fourierova rozvoje charakterizující pole s harmonickým stupněm n a amplitudou A vypadá takto:

$$F_n = A_n e^{-\frac{z}{z_0}}, \quad (16)$$

kde

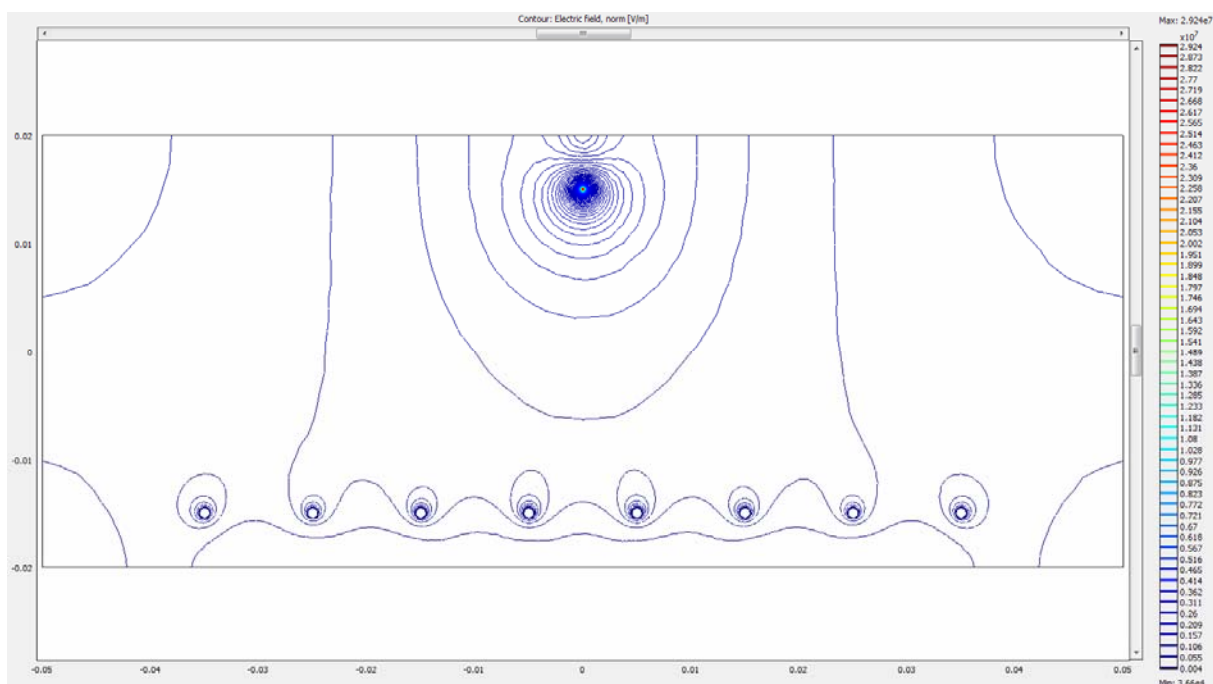
$$z_0 = \frac{L}{2\pi n}. \quad (17)$$

Pro první harmonickou ($n = 1$) se tedy amplituda snižuje s násobkem $e^{-2\pi}$ (výrazný pokles) pokaždé, když se od sítě vzdálíme po ose z o jednu velikost L (vzdálenost mezi vodiči sítě). Pokles dalších harmonických je ještě výraznější. Z toho je vidět, že ve vzdálenosti od sítě pouze několik délek L budou oscilace pole minimální a samotné pole tedy bude téměř uniformní.

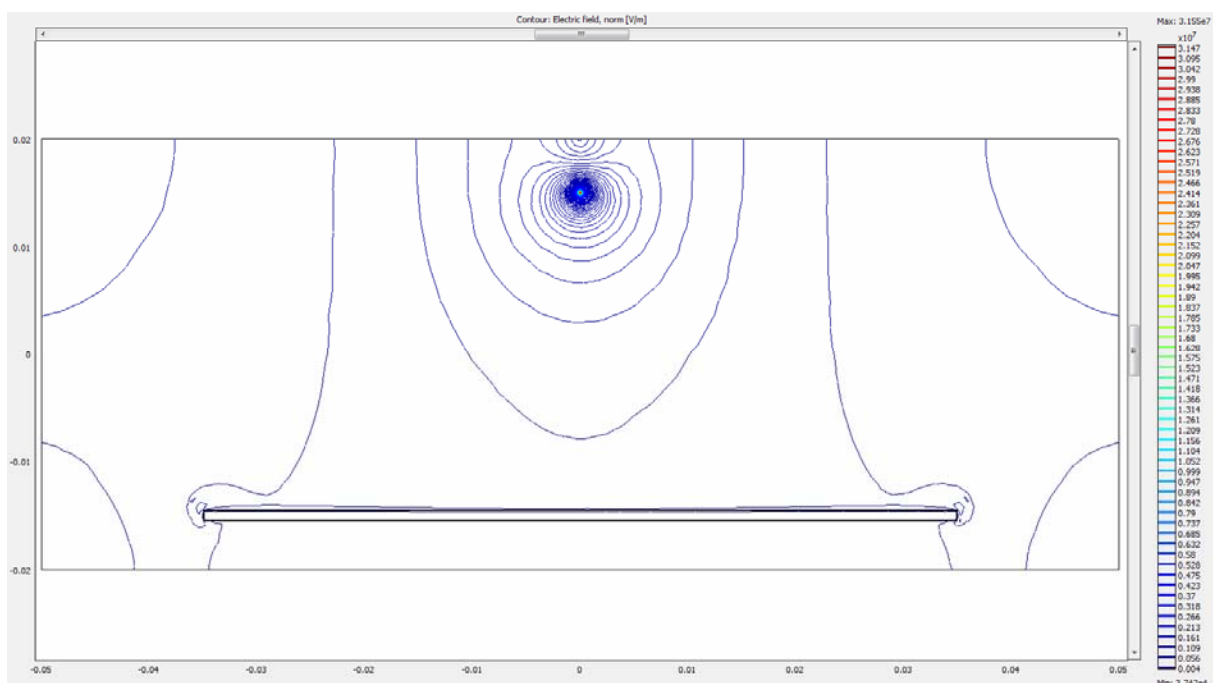
V případě již testovaného kondenzátoru na obr. 29 měla použitá síťka vzdálenost vláken $L = 1$ cm při vzdálenosti elektrod $d = 3$ cm. Vzdálenost od sítě je tedy trojnásobkem rozestupu jejích vláken. Amplituda oscilací elektrického pole v takové vzdálenosti poklesne s $e^{-6\pi}$. Pole tedy lze považovat za uniformní. K jeho homogenizaci přispívá také fakt, že použitá síťka není tvořena pouze jednou vrstvou paralelních vodičů. Navíc má ještě druhou vrstvu, kolmou na vrstvu původní.

Pro další potvrzení této teorie byla vytvořena simulace elektrického pole kolem kondenzátoru s velkou síťovou elektrodou (viz obr. 31). Problém byl zjednodušen pouze na 2D úlohu. Síťová elektroda je opět tvořena pouze jednou vrstvou paralelních vodičů. Simulace byla provedena v programu COMSOL. Ukazuje tvar ekvipotenciálních ploch (reprezentovaných křivkami ve 2D) charakterizujících rozložení elektrického pole mezi oběma elektrodami. Vykreslené ekvipotenciály jsou v každém bodě kolmé na směr vektoru elektrického pole a spojují místa s jeho stejnou intenzitou.

Jako důkaz, že je možné síťovou elektrodu nahradit vodivou plochou bez výrazných změn v rozložení elektrického pole, lze porovnat simulaci na obr. 31 se simulací na obr. 32. Zde je vykresleno elektrické pole kolem elektrod kondenzátoru se stejnými parametry jako v předchozím případě, jen síťová elektroda je nahrazena vodivou plochou o stejné tloušťce jako dráty tvořící síťku (1 mm).



Obr. 31: Simulace elektrického pole kolem soustavy dvou elektrod – malá elektroda připojená na napětí $U = 15 \text{ kV}$ je tvořena tenkým vodičem ($p = 0,1 \text{ mm}$), uzemněná velká elektroda je tvořena sítí paralelních vodičů s rozestupem $L = 1 \text{ cm}$ při vzdálenosti elektrod $d = 3 \text{ cm}$



Obr. 32: Simulace elektrického pole kolem soustavy dvou elektrod – malá elektroda připojená na napětí $U = 15 \text{ kV}$ je tvořena tenkým vodičem ($p = 0,1 \text{ mm}$) uzemněná velká elektroda je tvořena vodivou plochou při vzdálenosti elektrod $d = 3 \text{ cm}$

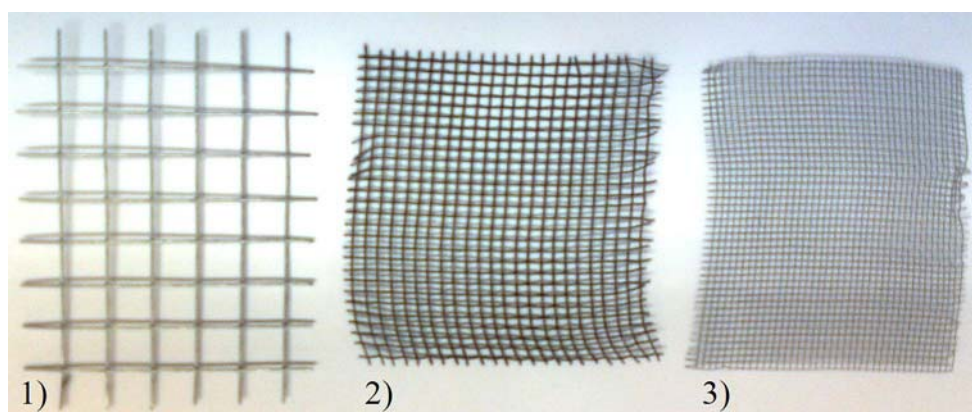
Ze srovnání výsledků obou simulací je zřejmé, že tvar elektrického pole je od určité vzdálenosti od velké elektrody nezávislý na tom, zda se jedná o vodivou plochu nebo o síť vodičů. Z obrázků je vidět, že tato vzdálenost je několikrát menší než použitá vzdálenost elektrod 3 cm.

6. 2. Hustota síťové elektrody

Aby bylo možné ověřit omezení vlivu aerodynamického odporu velké elektrody a zároveň splnění požadavků na tvar elektrické pole kolem velké elektrody, bylo nutné provést měření na kondenzátoru se síťovou elektrodou s různými vlastnostmi. Aby bylo možné výsledky těchto měření porovnávat, vnější rozměry (tvar, délka a , šířka c) síťové elektrody musí být stejné. Byl proto vyroben rám, ve kterém je možné vyměňovat sítě bez nutnosti stavět celý nový kondenzátor.

Nová konstrukce se skládá ze dvou obdélníkových plastových rámu, které je možné spojit šrouby. Aby nedocházelo k nechtěným interakcím s elektrickým polem v kondenzátoru, byly pro tento účel použity šrouby plastové. Mezi rámy je možné vložit a pomocí šroubů upevnit jakoukoliv síťku. Díky rámu je síťka vždy vypnutá a rovná. V případě jemnějších síťových struktur, které nejsou samonosné, je tato skutečnost velmi důležitá.

Pro měření byly vybrány tři sítě o různých průměrech vodičů p_v a s různým rozestupem L (viz obr. 33).



Obr. 33: Fotografie vzorků měřených vodivých sítí s parametry: 1) $L = 10 \text{ mm}$, $p_v = 1 \text{ mm}$,
2) $L = 2,5 \text{ mm}$, $p_v = 0,5 \text{ mm}$, 3) $L = 1,5 \text{ mm}$, $p_v = 0,2 \text{ mm}$

Ačkoliv jsou u každé sítě uvedeny dva údaje (vzdálenost vodičů L a průměr vodičů p_v), lze je definovat pomocí pouze jednoho parametru, který v sobě oba původní obsahuje. Protože $\frac{1}{L}$ udává počet paralelních vodičů na jednotku délky, lze zavést bezrozměrnou veličinu *hustota sítě* ρ_s definovanou jako podíl plochy zakryté sítí:

$$\rho_s = 2 \frac{p_v}{L} - \frac{p_v^2}{L^2}, \quad (18)$$

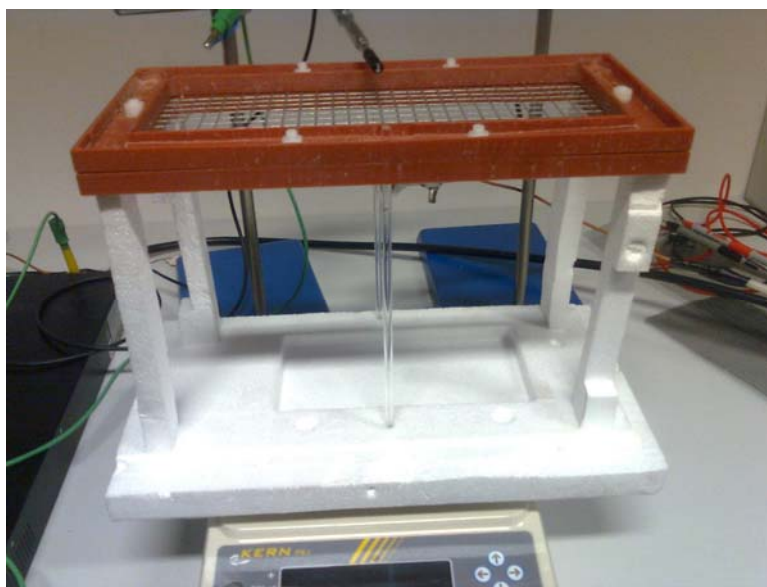
kde první podílový člen odpovídá ploše obou vrstev vodičů a druhý reprezentuje plochu překřížení vodičů, která by se jinak počítala dvakrát. Parametr ρ_s tedy udává část plochy, kterou zabírá síť o stejných vnějších rozměrech (a a c), a jeho hodnoty se pohybují v rozsahu od 0 do 1.

Sítě na obr. 33 lze tedy charakterizovat pomocí této nové veličiny následovně.

Tabulka 2: Vlastnosti měřených sítí

	průměr vodičů p_v [mm]	vzdálenost vodičů L [mm]	hustota sítě ρ_s [-]
síťka 1	1	10	0,19
síťka 2	0,5	2,5	0,36
síťka 3	0,2	1,5	0,25

Nově zkonstruovaný rám opatřený skleněnými distančními sloupky byl umístěn na váhu (viz obr. 34) a pomocí několika polystyrénových podpěr byl fixován v již ověřené orientaci (malá drátová elektroda umístěná pod velkou síťovou elektrodou). Aby bylo možné měřit také vliv hustoty sítě na proud neutrálních částic, byl do vzdálenosti 2 cm nad síťovou elektrodu umístěn senzor anemometru TESTO 425. Jelikož se nachází až za uzemněnou elektrodou, nebezpečí ovlivnění elektrickým polem je minimální. Ze stejného důvodu bude anemometr snímat rychlost proudění tvořeného neutrálními částicemi vzduchu procházejícími sítí. Po změření rychlosti pro síťové elektrody s různou hustotou (viz tabulka 2) bude možné rozhodnout, zda a jaký má tato veličina vliv na procházející proudění.

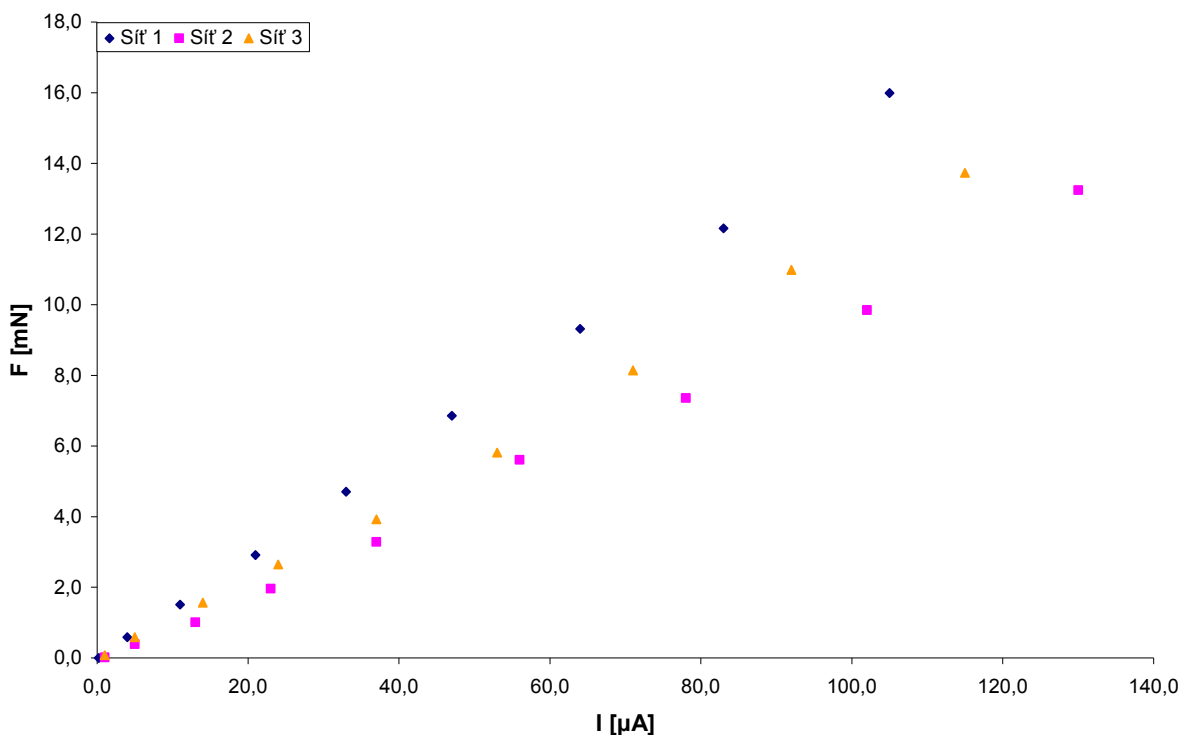


Obr. 34: Fotografie měřicí aparatury s novým kondenzátorem se síťovou elektrodou (na fotografii Síť 1) a s připojeným senzorem anemometru nad síťovou elektrodou

Síťová elektroda byla vždy přesně přizpůsobena vnitřním rozměrům plastového rámu tak, aby jej celý vyplnila. Plocha síťky svíraná rámem byla zanedbatelná, takže i v případě, že by pole této části síťky zakryté dielektrikem rámu mohlo ovlivňovat dráhy pohybujících se nabitých částic, byl by tento vliv minimální. Při zachování původního značení rozměrů asymetrického kondenzátoru (viz tabulka 1) je délka elektrody $a = 10$ cm a šířka velké elektrody $c = 26$ cm (tento rozměr byl zvolen kvůli maximální váživosti digitální váhy). U síťových elektrod tvořících rovnou plochu rozměr b odpovídá průměru vláken síťky p_v a není jej nutné uvažovat, neboť je proti ostatním rozměrům nepatrný.

Na grafu 15 je možné pozorovat několik zajímavých skutečností. První z nich je výrazně vyšší hodnota naměřené síly, než jaké byly pozorovány na kondenzátorech typu element. Při napětích, která byla použita při měření na kondenzátoru se síťovou elektrodou, byl element se stejnou délkou malé elektrody jen vzácně schopen generovat sílu blížíci se hodnotě 9 – 10 mN a na rozdíl od kondenzátoru se síťovou elektrodou ji nikdy nepřekročil.

Druhým poznatkem, který je možné z grafu 15 vyčíst, je vliv hustoty sítě ρ_s (viz tabulka 2) na velikost naměřené síly. Síť 1 s nejnižší hustotou ($\rho_s = 0,19$) vykazuje nejvyšší generovanou sílu pro daný procházející proud, zatímco kondenzátor opatřený velkou elektrodou ze sítě 2 s nejvyšší hustotou ($\rho_s = 0,36$) vykazuje nejnižší naměřenou sílu ze všech tří měřených kondenzátorů.



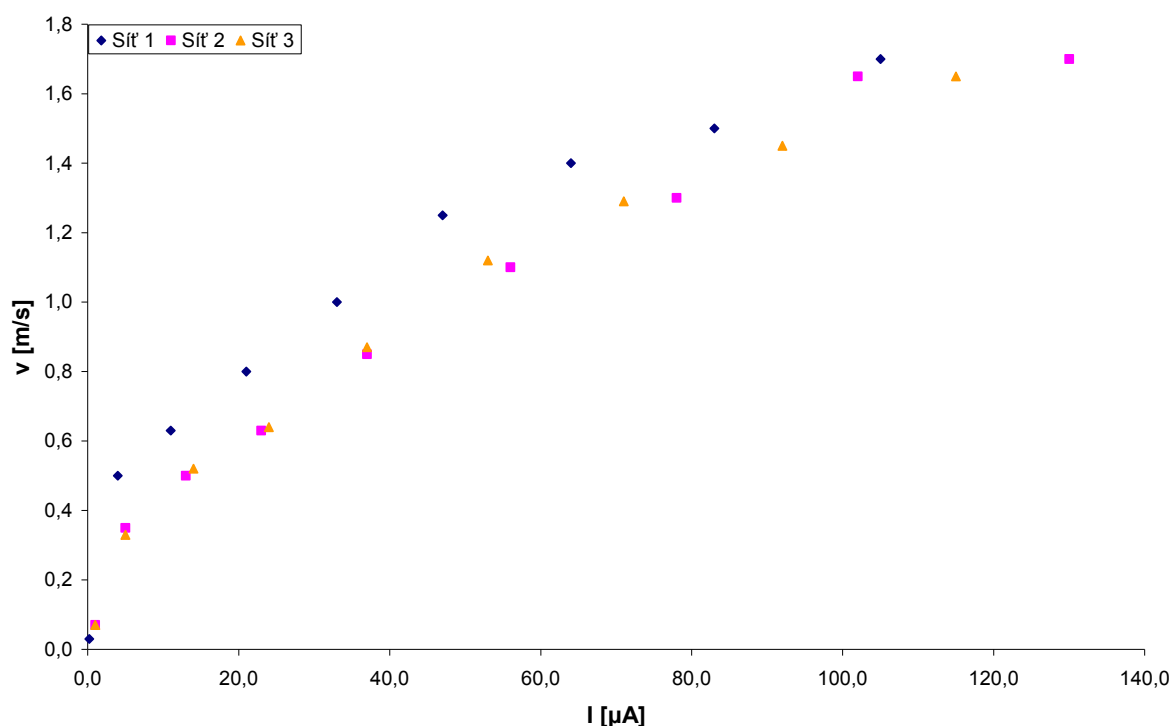
Graf 15: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro tři síťové elektrody s různou hustotou sítě při použitém napětí 7 kV – 23 kV

Důvodů pro tento rozdíl může být několik. Prvním z nich je rozdíl v naměřených hodnotách proudu pro stejnou hodnotu napětí pro různé sítě. V grafu 15 je možné pozorovat, že pro vyšší hodnoty proudu platí, že sítě s vyšší hustotou vykazují vyšší proud při stejném napětí než sítě s hustotou menší (např. síť 1 dosáhne proudu cca 100 μA při napětí 23 kV zatímco síť 2 dosáhne stejného proudu při napětí 21 kV). Ačkoliv se síťka z elektrického hlediska jeví jako plocha, siločáry elektrického pole se stejně mohou uzavírat pouze do vodičů sítě (viz simulace na obrázcích 32 a 33). Čím má síťka nižší hustotu, tím je menší plocha, ke které směřují nabitě částice letící od malé elektrody. Je možné, že zde dochází ke vzájemnému ovlivňování nabitých částic, které jsou elektrickým polem nuceny pohybovat se velice blízko sebe (mohou se projevit Coulombovské síly odpuzující od sebe částice stejné polarity).

Pro generování stejného procházejícího proudu potřebují sítě s nižší hustotou vyšší připojené napětí než sítě s hustotou vyšší. Právě vyšší napětí způsobující vyšší intenzitu elektrického pole mezi elektrodami má za následek větší silové působení na nabitě částice a tedy i vyšší generovanou sílu.

Druhou možností, jak lze vysvětlit rozdíl v hodnotách generované síly na kondenzátorech s různou hustotou sítě velké elektrody, je opět vliv aerodynamického odporu. Ten by měl být podle předpokladu vyšší pro síťovou elektrodu s vyšší hustotou, což by odpovídalo faktu, že hodnoty generované síly jsou nejvyšší pro síť s nejnižší hustotou a tedy nejnižším aerodynamickým odporem.

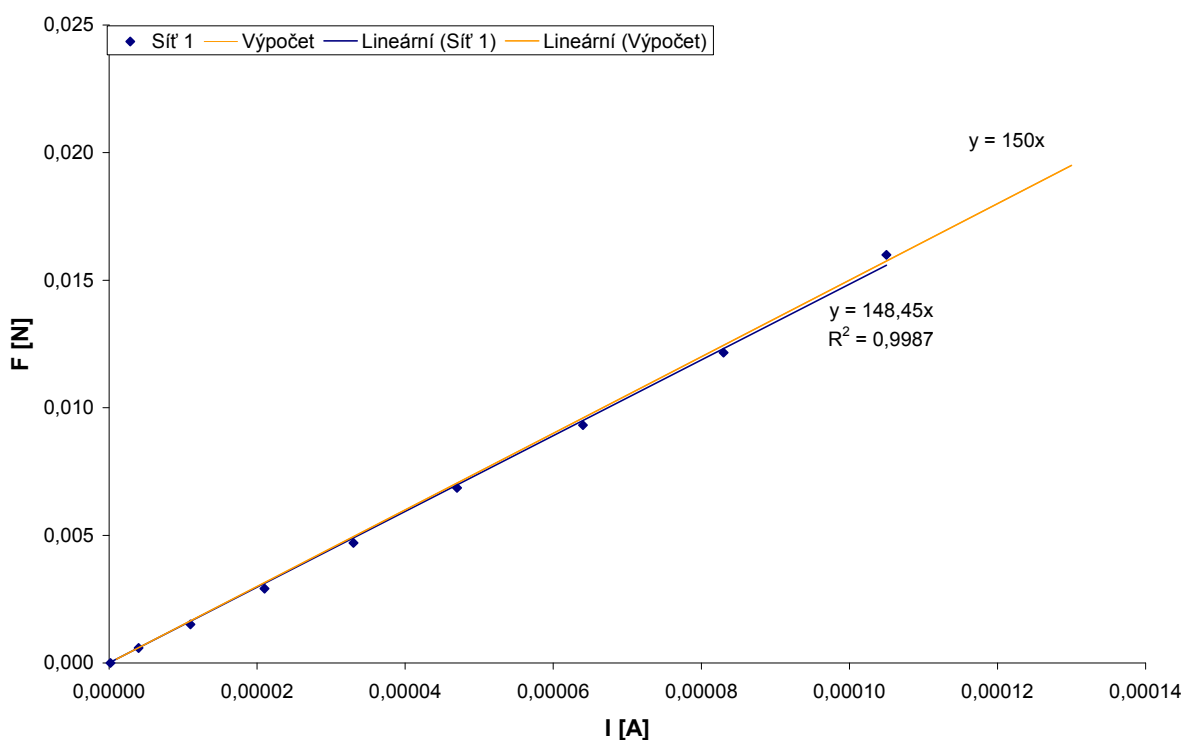
Stejně tak rychlost proudění vzduchu za síťovou elektrodou je nejvyšší pro síť 1 (nejnižší hustota sítě), jak je možné vidět na grafu 16. Ovšem rozdíly rychlostí získaných pomocí anemometru TESTO 425 (měřicího s přesností $\pm [0.03 \text{ m/s} + 5\% \text{ z naměřené hodnoty}]$) nejsou dostatečně velké na to, aby bylo možné prohlásit aerodynamický odpor za prokazatelnou příčinu rozdílu hodnot generované síly pro různé síťové elektrody.



Graf 16: Závislost rychlosti proudu vzduchu (naměřené 2 cm za síťovou elektrodou) na procházejícím proudu I pro tři síťové elektrody s různou hustotou sítě při použitém napětí 7 kV – 23 kV

Posledním poznatkem z grafu 15 je skutečnost, že i při maximálním použitém napětí 23 kV mají průběhy závislosti vznikající síly na procházejícím elektrickém proudu zcela lineární charakter. Tím se výrazně odlišují od průběhů naměřených pro původní element s kvádrou velkou elektrodou. Znamená to, že použitím síťové elektrody bylo dosaženo přiblížení k ideálnímu stavu, pro který byl odvozen vzorec (1).

Tuto skutečnost si lze ověřit na grafu 17, ve kterém jsou vyneseny hodnoty síly naměřené na síti 1 společně s hodnotami vypočtenými pomocí vzorce (1). Směrnice průběhu vypočtených hodnot odpovídá poměru $\frac{d}{k}$, kde d je vzdálenost elektrod a k odpovídá pohyblivosti iontů. Vzdálenost elektrod byla při měření 3 cm, a díky stejným podmínkám je možné počítat hodnotu konstanty pohyblivosti iontů použitou ve vztahu (15) v kapitole 5. 1., tedy $k = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Aby bylo možné porovnávat výsledné průběhy, bylo nutné převést naměřené hodnoty síly a elektrického proudu na základní jednotky.



Graf 17: Srovnání závislosti vznikající síly F na procházejícím proudu I naměřené pro síť 1 s vypočtenými hodnotami

Jako důkaz linearity byla v grafu 17 naměřenými hodnotami proložena lineární závislost (bez absolutního členu) vytvořená pomocí lineární regrese. Lineární závislost odpovídá naměřeným hodnotám s koeficientem spolehlivosti $R^2 = 0,9987$, což lze považovat za dobrou shodu. Stejnou shodu lze pozorovat mezi naměřenými hodnotami a hodnotami vypočtenými.

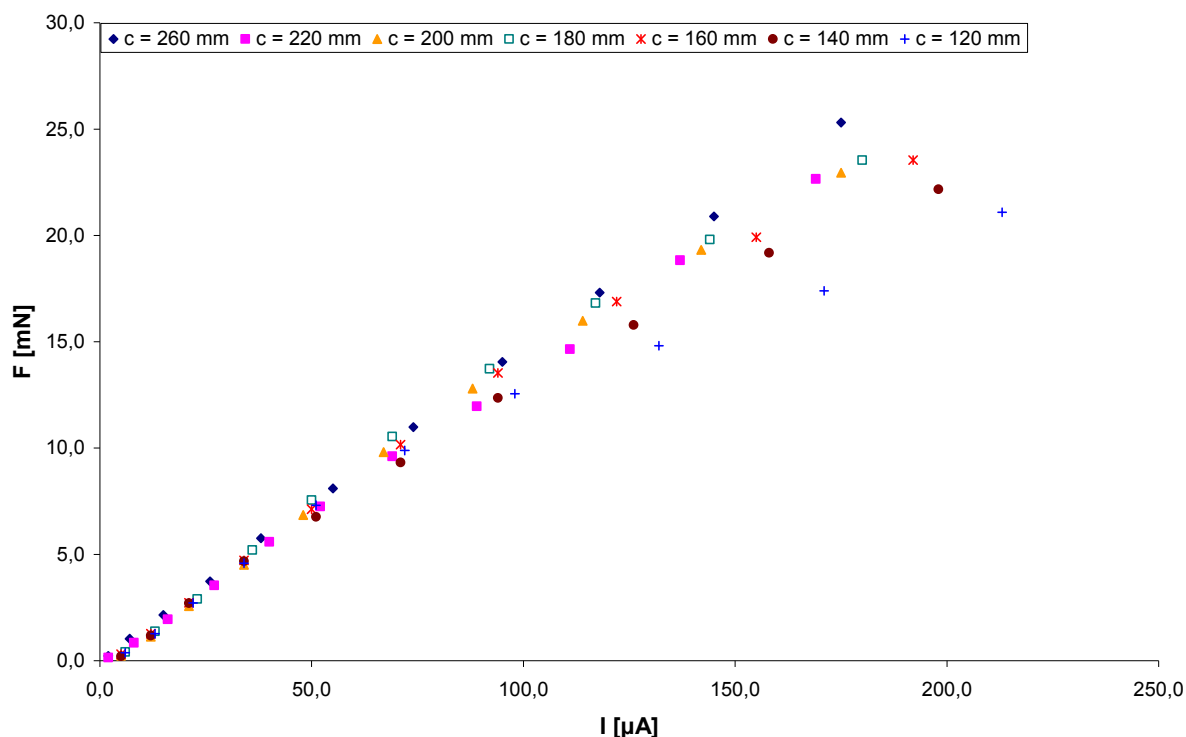
Při měření na elementech s kvádrou velkou elektrodou byla pozorována shoda naměřených a vypočtených hodnot pouze do velmi nízké hodnoty proudu. Následný rozdíl v naměřených a vypočtených hodnotách byl způsoben jednak rozdílem mezi předpokládaným a skutečným tvarem kondenzátoru a tedy i elektrického pole a také vlivem aerodynamického

odporu velké elektrody, který nebyl ve vzorci (1) nijak zohledněn. Použitím síťové elektrody se skutečný tvar elektrického pole kolem kondenzátoru přiblížil tvaru předpokládanému při odvození vzorce [16] a zároveň byl značně omezen vliv aerodynamického odporu. Oblast shody naměřených dat s hodnotami predikovanými vzorcem se tedy díky použití síťové elektrody výrazně rozšířila.

6. 3. Šířka síťové elektrody

V minulé kapitole bylo ukázáno, že použitím síťové elektrody s rozměry $a = 10$ cm a $c = 26$ cm je možné dosáhnout lineárního průběhu naměřených hodnot síly v závislosti na protékajícím elektrickém proudu až do maximálního měřeného napětí 23 kV. Je ovšem otázkou, jaká je minimální šířka elektrody c , aby tato lineární charakteristika platila pro celou „pracovní“ oblast kondenzátoru, tedy až do překročení dielektrické pevnosti vzduchu.

Proto byl proveden experiment, při kterém byla na zkoumaném kondenzátoru měřena vznikající síla pro připojené napětí až do průrazu. Po každém měření byla šířka síťové elektrody c snížena o danou hodnotu (při zachování délky elektrod a) a měření bylo provedeno znovu.

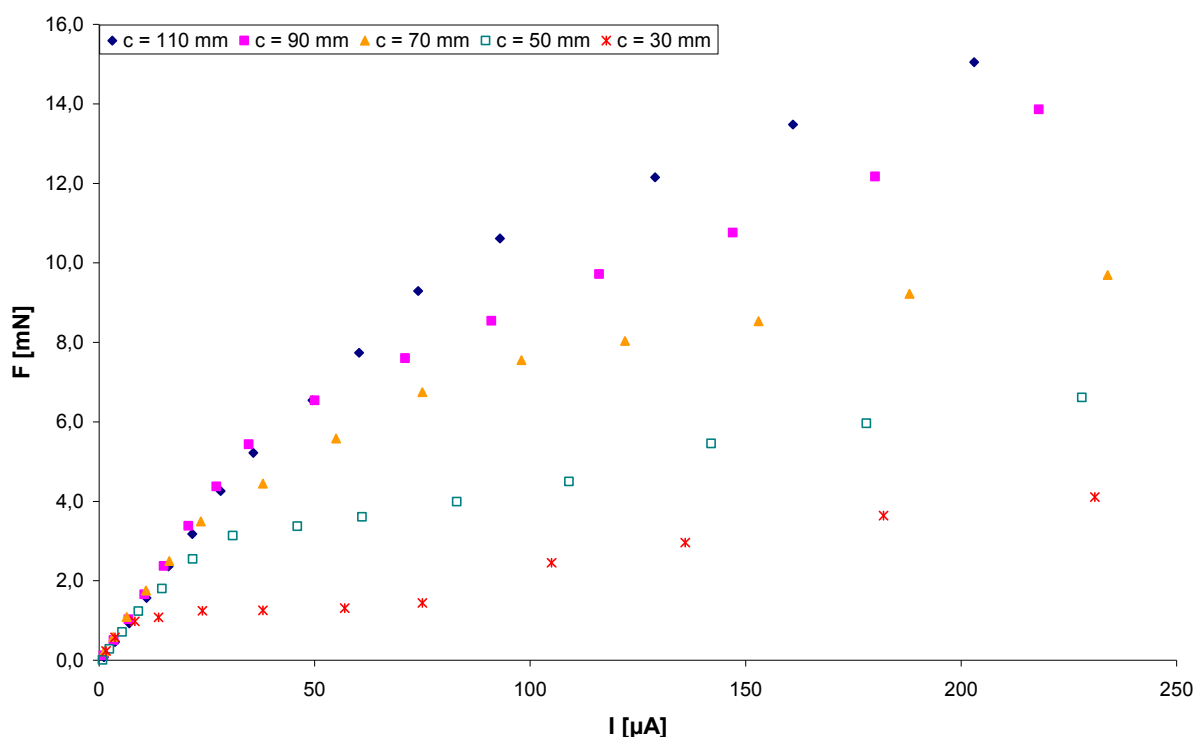


Graf 18: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro síťovou elektrodu o různé šířce c při použitém napětí 8 kV – 28 kV

Protože při použité vzdálenosti elektrod a v podmínkách, ve kterých bylo měření provedeno, došlo k překročení dielektrické pevnosti vzduchu při připojeném napětí cca 29 kV, byla měření prováděna do hodnoty napětí 28 kV.

Na grafu 18 je vidět, že pro velké elektrody o šířce 180 – 260 mm jsou naměřené hodnoty síly téměř totožné. Dokonce i průběh pro šířku 160 mm se odlišuje od předchozích pouze pro poslední naměřenou hodnotu (pro napětí 28 kV). Výraznější odklon od lineárního průběhu nastane až pro hodnoty šířky velké elektrody 140 mm a 120 mm. Z toho plyne, že čím je síťová elektroda širší, tím je kondenzátor blíže předpokládanému modelu „drát – plocha“. K dosažení kondenzátoru s lineární charakteristikou celého průběhu závislosti vznikající síly na procházejícím proudu je tedy potřeba zvolit co největší rozměr c . S dostatečnou přesností ale dostačuje $c > 160$ mm.

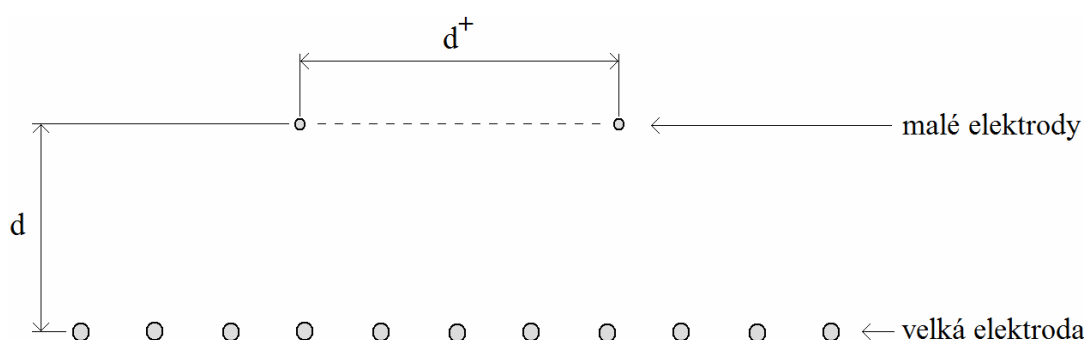
Pokud je zvolena hodnota šířky velké elektrody nižší než 180 mm, charakteristika průběhu se začne přibližovat grafům naměřeným na elementu. O této skutečnosti se lze přesvědčit na grafu 19, kde jsou vyneseny hodnoty síly naměřené na kondenzátorech s výrazně nižší šířkou síťové elektrody. Lze zde pozorovat zkracování lineární části průběhu pro kondenzátory s nižší hodnotou parametru c .



Graf 19: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I pro síťovou elektrodu o různé šířce c

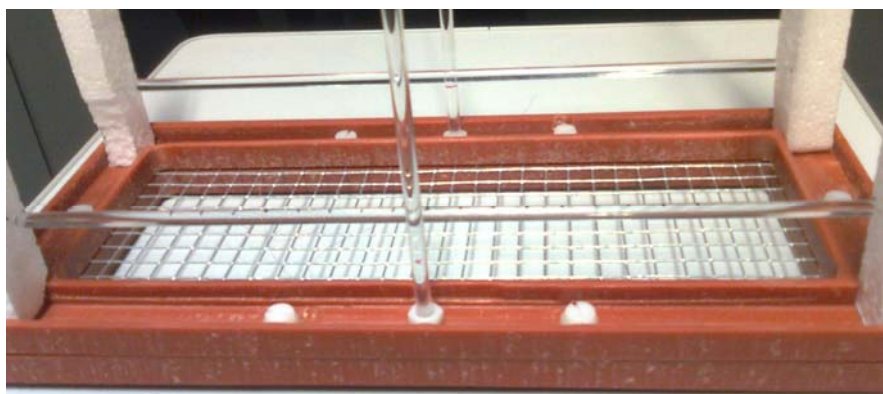
6. 4. Větší počet malých elektrod

V minulé kapitole byl popsán vliv změny šířky velké elektrody na velikost vznikající síly a především na charakter průběhu naměřené síly. Bylo prokázáno, že pro zachování lineárního průběhu naměřené síly existuje nutná minimální šířka velké síťové elektrody. V této kapitole je řešen případ velké síťové elektrody s konstantní šířkou (původní hodnota $c = 260$ mm) a snahou je využít tuto šířku efektivně přidáním další malé elektrody připojené na stejné napětí, tedy dalšího zdroje ionizace. Obě malé elektrody mají stejné rozměry (průměr p a délku a) a zachovávají stejnou vzdálenost od velké síťové elektrody d (viz obr. 35). Vzdálenost mezi malými elektrodami je značena d^+ .



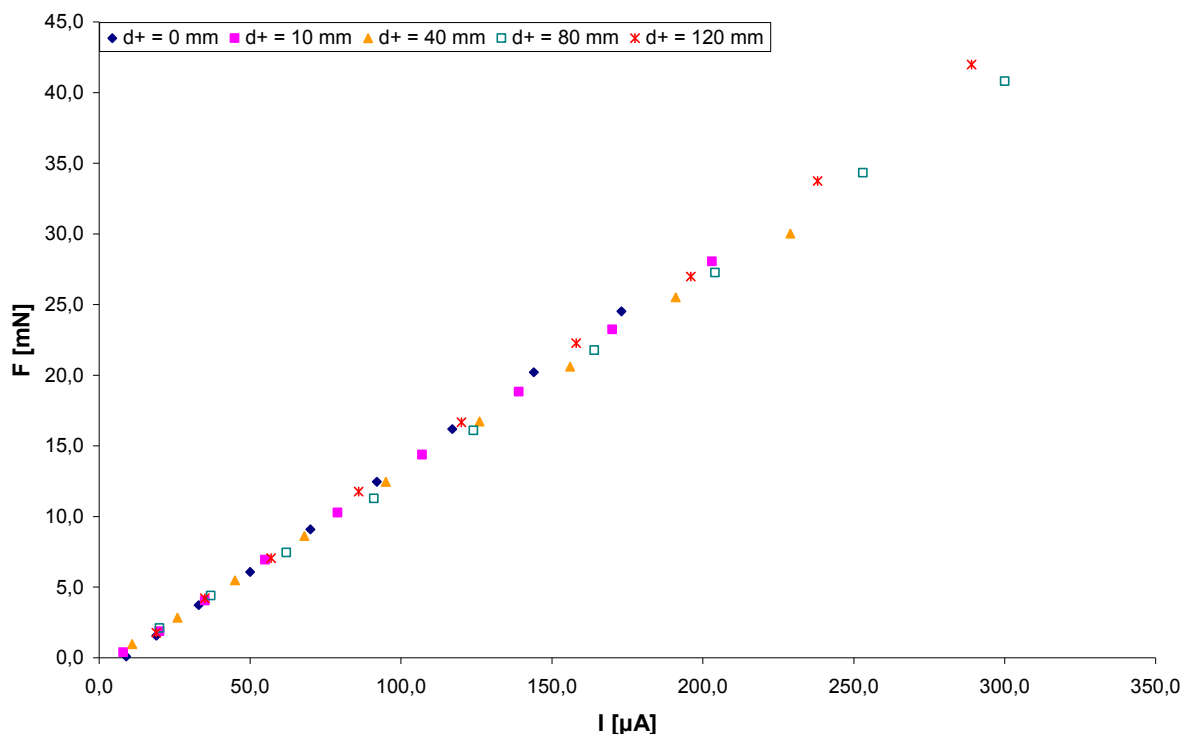
Obr. 35: Schéma kondenzátoru se síťovou elektrodou a dvěma kladnými drátovými elektrodami s vyznačenou vzdáleností mezi nimi

Aby bylo možné měnit vzájemnou vzdálenost malých elektrod d^+ při zachování vzdálenosti od velké elektrody d , bylo nutné modifikovat stávající kondenzátor. Byly k němu připevněny dvě skleněné tyčky rovnoběžně se síťovou elektrodou ve vzdálenosti 3 cm (viz obr. 36). Drátové elektrody lze napnout mezi horizontální tyčky s možností kontinuální změny jejich vzájemné vzdálenosti d^+ , aniž dojde ke změně vzdálenosti od velké elektrody.



Obr. 36: Fotografie kondenzátoru se síťovou elektrodou a novými horizontálními skleněnými tyčkami

Nejprve bylo opakováno měření na kondenzátoru s jednou malou elektrodou (aby bylo možné učinit srovnání). Toto měření je dále označováno jako měření s nulovou vzdáleností malých elektrod ($d^+ = 0$). Následně byla provedena měření pro dvě malé elektrody v různých vzdálenostech d^+ .

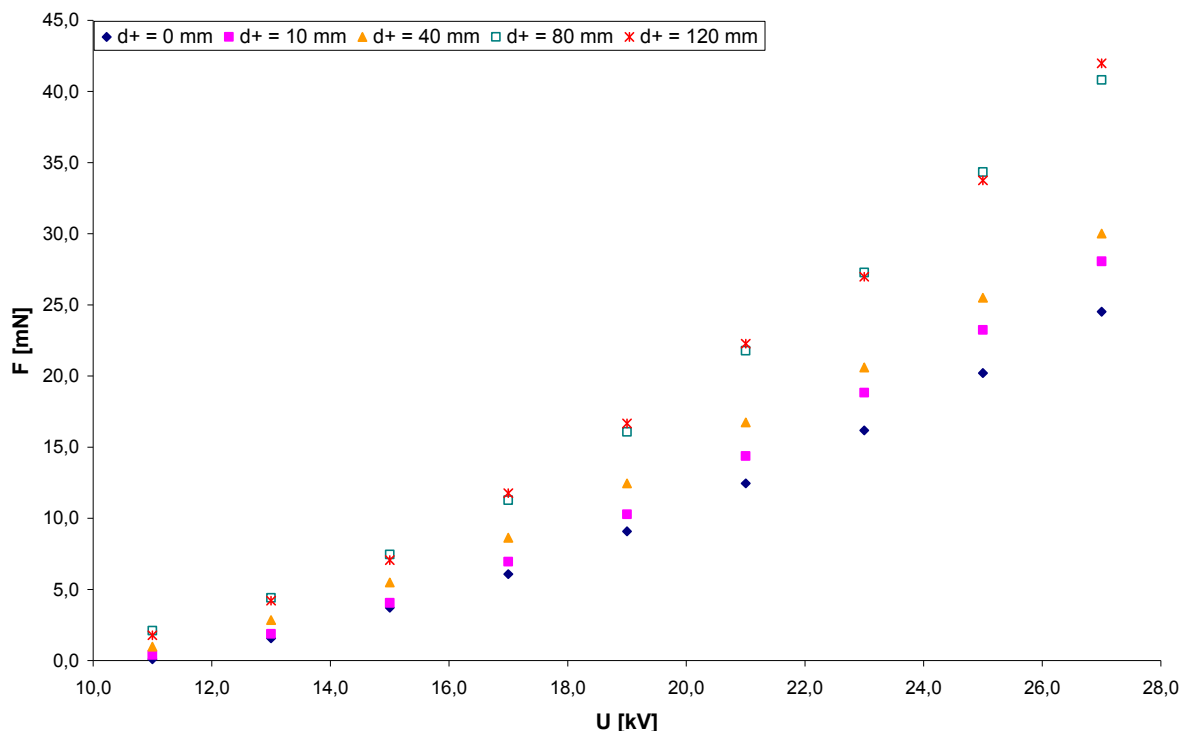


Graf 20: Závislost vznikající síly F na procházejícím proudu I na kondenzátoru s uzemněnou síťovou elektrodou a dvěma různě vzdálenými (d^+) malými elektrodami při použitém napětí 11 kV – 27 kV

Na grafu 20 vidíme, že se hodnoty síly naměřené na kondenzátoru s různou vzdáleností malých elektrod d^+ překrývají. Je vidět, že všechny průběhy zachovávají lineární charakteristiku a mají stejnou směrnicí, což lze interpretovat tak, že se nemění efektivita využití procházejícího proudu na generování vznikající síly. Jediným rozdílem mezi nimi je jejich „délka“. Průběhy naměřené pro větší vzdálenost d^+ dosahují při stejném připojeném napětí větší vznikající síly při vyšším procházejícím proudu.

Tato skutečnost je lépe pozorovatelná na grafu 21, ve kterém je vynesena závislost vznikající síly na připojeném napětí. Je zde dobře vidět, že kondenzátory se dvěma malými elektrodami vykazují větší sílu (pro stejné připojené napětí) než kondenzátor s jednou malou elektrodou, což lze vysvětlit tak, že přidáním druhé malé elektrody vzroste počet iontů

vznikajících kolem nabitých elektrod. Více iontů pohybujících se mezi elektrodami má za následek větší procházející proud a tedy i větší sílu.



Graf 21: Závislost vznikající síly F na připojeném napětí U na kondenzátoru s uzemněnou síťovou elektrodou a dvěma různě vzdálenými (d^+) kladnými elektrodami

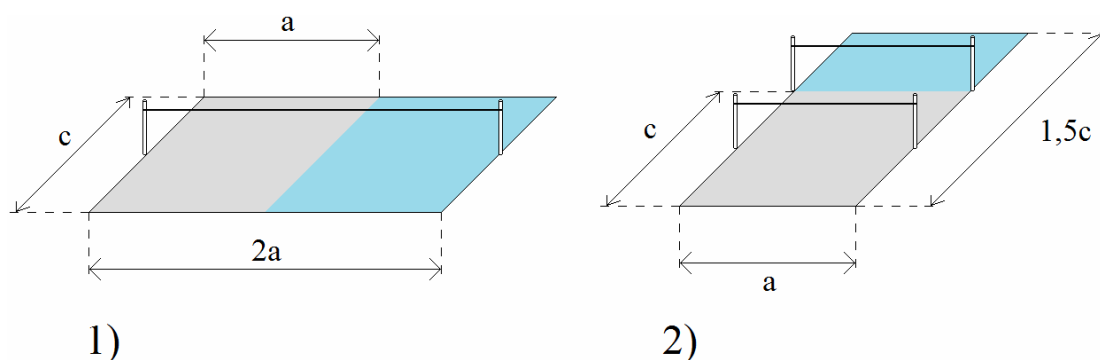
Rozdíl naměřených hodnot pro různé vzdálenosti d^+ lze zdůvodnit vzájemným ovlivňováním elektrických polí v okolí obou malých elektrod. Při dosažení dostatečné vzájemné vzdálenosti (80 mm) se tento jev omezí natolik, že další zvětšování vzdálenosti již nepřinese žádné zvýšení vznikající síly. Pokud je tedy vzdálenost mezi malými elektrodami 80 mm nebo více, kondenzátor generuje sílu, která je téměř dvojnásobkem síly generované na kondenzátoru s pouze jednou malou elektrodou (viz tabulka 3).

Tabulka 3: Porovnání hodnot vznikající síly na kondenzátoru s jednou malou elektrodou a na kondenzátoru s dvěma malými elektrodami ve vzájemné vzdálenosti 80 mm

U [kV]	11,0	13,0	15,0	17,0	19,0	21,0	23,0	25,0	27,0
F [mN] ($d^+ = 0$)	0,098	1,570	3,728	6,082	9,094	12,459	16,187	20,209	24,525
F [mN] ($d^+ = 80$ mm)	2,109	4,415	7,456	11,282	16,088	21,778	27,272	34,335	40,810

Dalším poznatkem z grafu 21 je skutečnost, že vzdálenost malých elektrod pro maximální přírůstek síly ($d^+ \geq 80$ mm) koresponduje s minimální použitelnou šířkou velké elektrody pro zachování lineárního průběhu ($c > 160$ mm), která byla popsána v předešlé kapitole.

Z těchto experimentů také plyne, že efektivita skládání malých elektrod „paralelně“ je z hlediska hmotnosti použitého materiálu vyšší než původně navrhované (kapitola 4. 3. a) „sériové“ prodloužování celého kondenzátoru (viz obr. 37).



Obr. 37: Schematické porovnání kondenzátorů se 1) „sériovým“ a 2) „paralelním“ prodloužením malé elektrody (malá elektroda má v obou případech celkový rozměr $2a$)

V sériovém uspořádání je k dosažení dvojnásobné délky malé elektrody a tedy i dvojnásobného nárůstu vznikající síly potřeba zvětšit plochu velké síťové elektrody také dvakrát. V paralelním uspořádání je ke stejnému výsledku nutné zvětšit plochu síťové elektrody pouze o 50 %.

7. Shrnutí

V této práci byly zkoumány vlivy změny rozměrů asymetrického kondenzátoru na sílu, kterou je po připojení na vysoké napětí schopen generovat. Byl ověřen základní princip předpokládající funkci malé elektrody jako zdroje ionizace a velké elektrody jako prvku určujícího směr elektrického pole v kondenzátoru, potažmo směr generované síly. Pro první sadu měření byl použit kondenzátor typu *element*, jehož malá elektroda byla tvořena tenkým drátem a velkou elektrodu tvořil polystyrenový kvádr potažený aluminiovou folií. Na základě výsledků měření byly učiněny tyto závěry:

- Snížením *průměru malé elektrody* p dojde ke zvýšení okolní intenzity elektrického pole a následného vzniku vyšší generované síly. Aby tedy kondenzátor generoval maximální sílu, je potřeba zvolit malou elektrodu s co nejmenším průměrem.

Pokud je ovšem p zvoleno příliš velké (závisí na velikosti a hrubosti povrchu velké elektrody), dojde k zániku generované síly, nebo dokonce k obrácení jejího směru. To je způsobeno „vyrovnáním“ rozměrů obou elektrod.

- Vliv *vzdálenosti elektrod* d je predikován vzorcem (1). Závislost byla potvrzena experimentálně. Vznikající síla opravdu roste s rostoucím d . Měření ovšem ukázalo, že pro hodnoty $d > 40$ mm již nenastává žádný další růst síly. Pro maximální sílu tedy nemá smysl volit hodnotu d vyšší než 40 mm.
- *Délka elektrod* a má multiplikativní vliv na elektrický proud procházející mezi elektrodami. Prodloužením elektrod je tedy možné zvětšit generovanou sílu při stejném připojeném napětí. Zvýšení a také prodlužuje lineární část průběhu predikovaného vzorcem (1), který je tedy možné použít pro větší rozsah hodnot.
- Zvětšení *výšky velké elektrody* b způsobí minimální nárůst generované síly.
- Měření na kondenzátorech s různou *šířkou velké elektrody* c ukázalo, že její vliv je dvojitý. Zvětšení c má za následek nárůst procházejícího proudu a měl by tak způsobit zvětšení generované síly. Zároveň ale klade větší aerodynamický odpor proudu vzduchu vyvolanému pohybem částic mezi elektrodami. Výsledná síla se tedy se zvýšením c zmenšuje.

Vliv proudění vzduchu při generování síly na elementu byl potvrzen odvozením vztahu pro rychlost tohoto proudění (13). Byl proto postaven kondenzátor zcela nového typu jehož velkou elektrodu tvořila *vodivá síť*. Následná měření ukázala toto:

- Nový kondenzátor s velkou elektrodou ve formě vodivé sítě je schopný generovat výrazně vyšší sílu než původně používaný element.
- S rostoucí *hustotou sítě* ρ_s klesá generovaná síla. Vodivou síť je ovšem nutné volit takovou, aby rozteč jejích vláken stále splňovala podmínky, aby bylo možné síť z elektrického hlediska považovat za vodivou plochu.
- Síla změřená na kondenzátoru se síťovou elektrodou má lineární průběh (ve vztahu k procházejícímu elektrickému proudu). Tím bylo dosaženo stavu popsaného vzorcem (1). Tento stav ovšem nastane pouze pokud je *šířka síťové elektrody* c větší než 160 mm. Pro nižší hodnoty začne opět docházet ke zlomu pozorovanému u elementů.
- Byla navržena a ověřena modifikace asymetrického kondenzátoru, která poskytuje možnost dosažení vyšší generované síly za použití více malých drátových elektrod. Podmínkou je dodržení *vzájemné vzdálenosti malých elektrod* d^+ větší než 80 mm.

Tento postup je alternativou ke zvyšování síly pomocí prodlužování *délky elektrod* a . K dosažení stejného cíle je ovšem potřeba pouze poloviční nárůst hmoty (popřípadě plochy) velké elektrody.

Závěr

Ve své disertační práci jsem zkoumal jev, při kterém po připojení vysokého napětí na soustavu dvou asymetrických elektrod (zde nazývaných asymetrický kondenzátor) dojde ke vzniku síly, která ovlivňuje obě elektrody ve stejném směru. Zaměřil jsem se na popis vlivu změny tvaru elektrod kondenzátoru na generovanou sílu. Přesto, že od objevu tohoto jevu uplynulo již téměř 90 let, nebyl vliv tvaru kondenzátoru, pokud je mi známo, podroben jakémukoliv důkladnějšímu zkoumání.

Protože jsou síly vznikající na kondenzátoru z mnoha důvodů běžnými metodami obtížně měřitelné, získával jsem hodnoty síly pomocí digitální váhy jako změnu hmotnosti. Nejprve byl postaven kondenzátor jednoduché konstrukce, který dovoľoval změnu jednotlivých rozměrů. Na základě výsledků měření na tomto kondenzátoru jsem byl schopen popsat, jakým způsobem ovlivní změny jednotlivých rozměrů kondenzátoru sílu na něm vznikající. Dále jsem zkoumal proudění okolního média, které je vyvolané stejným jevem, jenž je příčinnou generování síly. Ukázal jsem, že pro některé tvary kondenzátoru, které by měly podle předběžných měření vykazovat maximální vznikající sílu, je vliv okolního proudění negativní a natolik významný, že je generovaná síla minimální.

Na základě výsledků dosavadních měření jsem navrhl a sestrojil zcela nový kondenzátor takové konstrukce, aby eliminoval popsané negativní vlivy. Tento nový design se ukázal být výrazně efektivnějším než dosud používané modely. Následným měřením jsem popsal vlivy změn všech nových rozměrů. Dále byly popsány možnosti, jak na asymetrickém kondenzátoru dosáhnout ještě větší generované síly.

Cíle, které jsem si pro vypracování práce stanovil, byly splněny. Vybral jsem vhodnou měřicí metodu, našel jsem a popsal vybraný kondenzátor i vlivy okolního proudění. Na základě získaných dat jsem navrhl ideální tvar, který jsem následně podrobil měření a popsal.

Hlavním přínosem práce je podrobný popis vlivu jednotlivých tvarových variant elektrod asymetrického kondenzátoru na vznikající sílu. Ačkoliv byla měření prováděna pouze na dvou typech kondenzátoru, závěry, které z měření vyplynuly, lze snadno zobecnit na jakékoliv jiné modely pracující na stejném principu. Pokud je mi známo, jedná se o první práci, zabývající se tvarem a rozměry kondenzátoru takto detailně a komplexně.

Zkoumání jevů na kondenzátorech s asymetrickými elektrodami však ještě zdaleka není dokončeno. V rámci vymezení tématu jsem ve své práci příliš nezabíhal do oblastí spojených s „elektrickou“ podstatou fungování jevu. Z tohoto důvodu bude další práce směřovat

k oblastem, ve kterých se prolíná zde zkoumaná mechanická (rozměrová) část výzkumu s elektrickou. Fungování tohoto jevu je totiž stále postaveno na vysokém napětí a pohybu elektricky nabitých částic - elektrickém proudu. Ačkoliv tedy autor této práce přišel s kvalitativním popisem vlivu změny rozměrů na velikost vznikající síly, kvantifikovat jej bude možné až spojením obou oblastí výzkumu.

Použitá literatura

- [1] *Nová citační norma ČSN ISO 690:2011 - Bibliografické citace*, [cit. 2014-02-03],
Dostupné z: <https://sites.google.com/site/novaiso690/>
- [2] *Wikipedia – The Free Encyclopedia*, [cit. 2013-08-09], Dostupné z: <http://en.wikipedia.org>
- [3] BROWN, T. T., *A Method of and an Apparatus or Machine for Producing Force or Motion*. britský patent č. 300311, 1928
- [4] BROWN, T. T., *Elektrokinetic Apparatus*. U.S. patent č. 2949550, 1960
- [5] BAHNSON, A. H., *Electrical Thrust Producing Device*. U.S. patent č. 2958790, 1960
- [6] BROWN, T. T., *Elektrokinetic Transducer*. U.S. patent č. 3018394, 1962
- [7] BROWN, T. T., *Elektrokinetic Apparatus*. U.S. patent č. 3187206, 1965
- [8] CAMPBELL, J. W., *Apparatus and method for generating thrust using a two dimensional asymmetrical capacitor module*. U.S. patent č. 6317310, 2001
- [9] BAHDER, T. B., FAZI, C., *Force on an Asymmetric Capacitor*. U.S. Army Research Laboratory Report, Adelphi 2003
- [10] DE SEVERSKY, A. P., *Ionocraft*. U.S. patent č. 3130945, 1964
- [11] CANNING, F. X., *Asymmetrical Capacitors for Propulsion*. NASA/CR-2004-213312
West Virginia 2004
- [12] RICKARD, M., DUNN-RANKIN, D., WEINBERG, F., CARLETON, F., *Maximizing ion-driven flows*. Journal of Electrostatics, Volume 64, Issue 6. 2006 pp. 368-376
- [13] MATSOUKAS, G., AHMED, N. A., *Investigation of Ionic Wind as a Means of Generating Propulsive Force*. International Review of Aerospace Engineering, Volume 5, Issue 2. 2012 pp. 35-39
- [14] MUSHA, T., *Theoretical Explanation of the Biefeld-Brown Effect*. Electric Spacecraft Journal, Issue 31, 2000 pp. 29-35
- [15] KIRBY, B. J., *Micro- and Nanoscale Fluid Mechanics: Transport in Microfluidic Device*. Cambridge University Press. pp. 373-382 ISBN 978-0-521-11903-0
- [16] PRIMAS, J., MALÍK, M., JAŠÍKOVÁ, D., KOPECKÝ, V., *Force on high voltage capacitor with asymmetrical electrodes*. Proceedings of WASET 2010 Conference, Amsterdam. 2010

- [17] HORÁK, Z., *Fyzika*. SNTL Praha, 1981.
- [18] KARJAKIN, N. I., BYSTROV, K. N., KOREJEC, P. S., *Přehled fyziky*. SNTL Praha 1970
- [19] MALÍK, M., PRIMAS, J., SVOBODA, M., *Influence of the insulating material on current efficiency and force on a high voltage capacitor with asymmetrical electrodes*. International Journal of WORLD ACADEMY OF SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 2013.
- [20] AKOPJAN, A. A., *Technika vysokého napětí*. SNTL Praha, 1956.
- [21] MALÍK, M., PRIMAS, J., KOPECKÝ, V., SVOBODA, M., *Calculation and measurement of a neutral air flow velocity impacting a high voltage capacitor with asymmetrical electrodes*. AIP Advances Vol. 4, No. 1, 2014.
- [22] FEYNMAN, R. P., *The Feynman lectures on physics Vol. 2*. California Institute of Technology, 1977. pp. 92-93 ISBN 0-201-02010-6-H

Vlastní publikace autora

MALÍK, M., PRIMAS, J., KOŠEK, M., RICHTER, A. *Approximation of strong electric field*. Proceedings of conference Advanced Methods in the Theory of Electrical Engineering, Pilsen: University of West Bohemia, 2009, pp. 13-14.

MALÍK, M., PRIMAS, J., JAŠÍKOVÁ, D., KOPECKÝ, V. *Force on high voltage capacitor with asymmetrical electrodes*. Proceedings of WASET 2010 Conference, Amsterdam. ISSN 1307-6892

MALÍK, M., PRIMAS, J., KOPECKÝ, V. *Proudění a vznik síly na kondenzátoru s asymetrickými elektrodami*. Sborník 24. Sympozia o Anemometrii, Holany-Litice 2010. ISBN 978-80-87117-07-1

MALÍK, M., PRIMAS, J., JAŠÍKOVÁ, D., KOPECKÝ, V. *Mathematical description of the Biefeld-Brown effect*. ISMOT Proceedings 2011 Conference, Praha: FEL ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04887-0

MALÍK, M., PRIMAS, J., JAŠÍKOVÁ, D., KOPECKÝ, V. *The influence of electrode heating on the force generated on a high voltage capacitor with asymmetrical electrodes*. International Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology, (eISSN: 2010-3778), Issue 67, pp.1230-1232, 2012.

MALÍK, M., PRIMAS, J., SVOBODA, M. *Influence of the insulating material on current efficiency and force on a high voltage capacitor with asymmetrical electrodes*. International Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology, Issue 79, Stockholm, 2013. pp. 1546-1548 pISSN 2010-376X

MALÍK, M., PRIMAS, J., KOPECKÝ, V., SVOBODA, M. *Calculation and measurement of a neutral air flow velocity impacting a high voltage capacitor with asymmetrical electrodes*. AIP Advances Vol. 4, No. 1, 2014.